

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Dominik Rukljač

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Doc. Dr. sc. Goran Šagi, dipl. ing.

Student:

Dominik Rukljač

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svima, a osobito roditeljima koji su mi bili velika podrška tijekom studiranja te su mi omogućili da se u miru posvetim samo fakultetu.

Također zahvaljujem mentoru doc.dr.sc. Goranu Šagiu na ukazanom povjerenju i strpljenju tijekom izrade ovog rada te na njegovoj ažurnosti i smirenosti.

Dominik Rukljač



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Dominik Rukljač**

Mat. br.: 0035190788

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Niskopodni električni minibus za javni gradski prijevoz**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Low-floor electric minibus for public transport**

Opis zadatka:

Imajući u vidu potrebe smanjenja zagađenja u gradovima, obveze smanjenja emisija stakleničkih plinova i potrebe tržišta, u ovom radu potrebno je razmotriti koncept gradskog minibusa s električnim pogonskim sustavom.

U okviru završnog rada potrebno je:

- Prikazati primjere minibusa namijenjenih javnom gradskom prijevozu (naglasak staviti na minibus s električnim pogonskim sustavom) te navesti njihove karakteristike.
- Analizirati i odrediti energetske potrebe gradskog minibusa s električnim pogonskim sustavom za standardni ispitni ciklus za autobuse *Braunschweig City Driving Cycle*.
- Odrediti potrebne karakteristike elektromotora (brzina vrtnje, snaga, moment) i baterija (tehnologija, kapacitet, masa, volumen).
- Proračunati performanse gradskog minibusa s električnim pogonskim sustavom.
- Za koncept niskopodnog minibusa razmotriti mogući smještaj baterija.
- Izraditi grubi model i dispozicijski crtež s pozicijama komponenti električnog pogonskog sustava u niskopodnom minibusu.
- Izraditi troškovnik električnog pogonskog sustava.

Pri izradi se treba pridržavati uobičajenih pravila za izradu završnog rada. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. studenog 2017.

Rok predaje rada:

- 1. rok: 23. veljače 2018.
- 2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.
- 3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:

- 1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.
- 2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.
- 3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Goran Šagi

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
1.1. Općenito o minibusima	1
2. PRIMJERI MINIBUSEVA	2
2.1. Najčešći primjeri minibuseva u Republici Hrvatskoj	3
2.2. Cacciamali Urby C65	5
2.3. Iveco Stratos LF 38 SPP	6
2.4. Mellor Coachcraft Orion E	7
2.5. Optare Solo EV	8
2.6. Solaris Urbino 8,9	9
2.7. Manji primjeri minibuseva.....	10
2.7.1. Rampini Wolta	10
2.7.2. ZEUS M 200 E.....	11
2.8. Kratki zaključak o prikazanim električnim minibusima	12
3. BRAUNSCHWEIG CIKLUS I KONCEPT ELEKTRIČNOG MINIBUSA	13
3.1. Braunschweig gradski ispitni vozni ciklus.....	13
3.2. Koncept minibusa, projekt Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu	14
4. ODREĐIVANJE POGONSKOG SUSTAVA MINIBUSA.....	16
4.1. Energetske potrebe gradskog minibusa s električnim pogonskim sustavom	16
4.2. Otpori vožnje.....	17
4.2.1. Sila otpora kotrljanja.....	17
4.2.2. Sila otpora zraka	18
4.2.3. Sila otpora uspona.....	18
4.2.4. Sila otpora ubrzanja	18
4.2.5. Vučna sila, potrebna snaga i moment elektromotora	19
4.3. Potreban kapacitet baterija	21
4.4. Odabir elektromotora	22
4.4.1. Kriterij maksimalne brzine.....	22
4.4.2. Kriterij maksimalnog ubrzanja	23
4.4.3. Kriterij maksimalnog uspona.....	23
4.5. Odabrani elektromotor	23
4.6. Transmisija.....	25
4.6.1. Mjenjač s 2 stupnja prijenosa.....	25
4.7. Određivanje ostalih dijelova pogonskog sustava	26
4.8. Baterije za minibus.....	27
4.9. Neki od mogućih razmještaja baterija i ostalih komponenti pogona u minibusu	30
4.9.1. Razmještaj a).....	32
4.9.2. Razmještaj b)	33
4.9.3. Razmještaj c).....	34

5. PRORAČUN PERFORMANSI ELEKTRIČNOG MINIBUSA.....	36
5.1. Vučni dijagrami.....	36
5.2. Ubrzanje električnog minibusa	41
6. TROŠKOVNIK ELEKTRIČNOG POGONSKOG SUSTAVA	44
7. ZAKLJUČAK.....	47
LITERATURA.....	48
PRILOZI.....	50

POPIS SLIKA

Slika 1.	Volkswagen Type-2 [2]	1
Slika 2.	Minibus prerađen za prijevoz osoba s invaliditetom [4]	2
Slika 3.	Fiat Ducato Minibus [5]	4
Slika 4.	Mercedes-Benz Sprinter Minibus [6]	4
Slika 5.	Volkswagen Crafter Minibus [7]	4
Slika 6.	Cacciamali Urby C65 [8]	5
Slika 7.	Iveco Stratos LF 38 SPP [9]	6
Slika 8.	Mellor Coachcraft Orion E [10]	8
Slika 9.	Kompaktni pogonski sustav tvrtke EMOSS [10]	8
Slika 10.	Optare solo EV [11]	9
Slika 11.	Solaris Urbino 8,9 [13]	10
Slika 12.	Rampini Wolta [14]	11
Slika 13.	ZEUS M 200 E [15]	12
Slika 14.	Dijagram brzine u ovisnosti o vremenu za Braunschweig ispitni vozni ciklus.....	13
Slika 15.	Koncept minibusa Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu	15
Slika 16.	Dimenzije minibusa.....	15
Slika 17.	Sile otpora vožnje koje djeluju na vozilo za vrijeme vožnje	17
Slika 18.	Dijagram vučne sile u ovisnosti o vremenu	19
Slika 19.	Dijagram potrebnog momenta elektromotora u ovisnosti o vremenu.....	20
Slika 20.	Dijagram potrebne snage elektromotora u ovisnosti o vremenu.....	20
Slika 21.	Potrošena energija i energija dobivena regenerativnim kočenjem tijekom vožnje Braunschweig ispitnim voznim ciklusom	21
Slika 22.	Drive motor 1PV5138-4WS24, Siemens [18]	24
Slika 23.	Dijagram momenta i snage u ovisnosti o brzini vrtnje [18].....	24
Slika 24.	Shema pogonskog sustava električnog vozila.....	26
Slika 25.	Gustoća pohranjene energije Li-ion baterija u usporedbi s olovnom baterijom [19]	28
Slika 26.	Zastupljenost pojedinih vrsta baterija u svijetu.....	29
Slika 27.	Baterijski paket tvrtke EnerDel, model PE350-689 [20]	29
Slika 28.	Razmještaj a).....	32
Slika 29.	Razmještaj b).....	33
Slika 30.	Razmještaj c).....	34
Slika 31.	Razmještaj glavnih komponenti električnog pogonskog sustava	35
Slika 32.	Dijagram vučnih sila pri nazivnoj snazi.....	37
Slika 33.	Dijagram vučnih sila pri vršnoj snazi	39
Slika 34.	Dijagram vučnih sila na kojem su ucrtani otpori vožnje pri usponima od 5 %, 12 %, 20% i 30 %	40
Slika 35.	Dijagram ubrzanja u ovisnosti o stupnju prijenosa.....	42
Slika 36.	Dijagram brzine u ovisnosti o vremenu u ovisnosti o stupnju prijenosa	43
Slika 37.	Pad cijene 1 kW/h litij-ionske baterije od 2010. godine	44

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Primjeri najčešćih minibuseva na prometnicama RH	3
Tablica 2.	Cacciamali Urby C65, tehnički podaci.....	5
Tablica 3.	Iveco stratos LF 38 SPP, tehnički podaci [9]	6
Tablica 4.	Mellor Coachcraft Orion E, tehnički podaci [10].....	7
Tablica 5.	Optare Solo EV; tehnički podaci [11]	9
Tablica 6.	Solaris Urbino 8,9; tehnički podaci [12]	10
Tablica 7.	Rampini Wolta; tehnički podaci [14]	11
Tablica 8.	ZEUS M 200 E; tehnički podaci [15]	12
Tablica 9.	Art.Kinema parametri za Braunschweig gradski ispitni vozni ciklus [16]	14
Tablica 10.	Ulazni podaci konceptualnog minibusa	16
Tablica 11.	Podaci o elektromotoru [18]	24
Tablica 12.	Prijenosni omjeri transmisije.....	26
Tablica 13.	Specifikacije baterijskog paketa tvrtke EnerDel, model PE 350-689 [20].....	30
Tablica 14.	Gabaritne mjere komponenti pogona i njihove mase.....	31
Tablica 15.	Prednosti i nedostaci razmještaja a)	32
Tablica 16.	Prednosti i nedostaci razmještaja b)	33
Tablica 17.	Prednosti i nedostaci razmještaja c)	34
Tablica 18.	Vučne sile u pojedinom stupnju prijenosa pri nazivnoj snazi elektromotora	36
Tablica 19.	Vučne sile u pojedinom stupnju prijenosa pri vršnoj snazi elektromotora	38
Tablica 20.	Ukupni otpori vožnje pri usponima od 5 %, 12 %, 20 % i 30 %	39
Tablica 21.	Ubrzanje u pojedinom stupnju prijenosa.....	41
Tablica 22.	Vrijeme potrebno za ubrzanje do maksimalne brzine	42
Tablica 23.	Cijene komponenti električnog pogonskog sustava konceptualnog minibusa....	44
Tablica 24.	Troškovnik eksploatacije električnog minibusa i vozila s Diesellovim motorom	46

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a	m/s^2	Translatorno ubrzanje vozila
A	m^2	Čeona površina vozila
B	m	Širina vozila
c_w	-	Faktor otpora zraka
F_v	N	Vučna sila
F_z	N	Sila otpora zraka
F_k	N	Sila otpora kotrljanja
F_u	N	Sila otpora uspona
F_a	N	Sila otpora ubrzanja
g	m/s^2	Ubrzanje sile teže
G	N	Težina vozila
H	m	Visina vozila
i_{or}	-	Prijenosni omjer diferencijala
$i_{m,I}$	-	Prijenosni omjer prvog stupnja mjenjača
$i_{m,II}$	-	Prijenosni omjer drugog stupnja mjenjača
$i_{uk,i}$	-	Ukupan prijenosni omjer i-tog stupnja prijenosa
L	m	Duljina vozila
m_v	kg	Masa praznog vozila
m_t	kg	Masa tereta
m_{uk}	kg	Ukupna masa vozila
M_p	Nm	Pogonski moment na kotačima
$M_{el,max}$	Nm	Vršni moment elektromotora
n	min^{-1}	Brzina vrtnje elektromotora
$n_{el,max}$	min^{-1}	Maksimalna brzina vrtnje elektromotora
P_{EM}	kW	Snaga elektromotora
r_{din}	m	Dinamički polumjer kotača
s	%	Uspon u postotcima
t	s	Vrijeme
v	km/h, m/s	Brzina
v_o	km/h, m/s	Brzina protuvjetra
v_{max}	km/h, m/s	Maksimalna brzina
α	$^\circ$	Kut uspona podloge

Oznaka	Jedinica	Opis
η_m	-	Mehanički stupanj djelovanja
$\eta_{b,p}$	-	Stupanj korisnosti baterije i punjača
ρ_z	kg/m ³	Gustoća zraka

SAŽETAK

U skladu sa sve prisutnijim trendom korištenja električnih vozila koja ne zagađuju okoliš, u ovom radu će se prikazati elektrifikacija konceptualnog niskopodnog minibusa za javni gradski prijevoz. U radu je prikazano dimenzioniranje i odabir svih komponenti električnog pogonskog sustava te određivanje njihovog najprihvatljivijeg razmještaja kako bi vozilo imalo zadovoljavajuće performanse, više prostora za putnike te sa pogonskog i konstrukcijskog aspekta najpovoljniju opterećenost. Potreban kapacitet baterija se izračunava pomoću Braunschweig ispitnog voznog ciklusa, a snaga elektromotora pomoću otpora vožnje pri vožnji u realnim uvjetima gdje su prisutni i usponi. Sve to treba biti financijski isplativo, inače cijela ideja nema smisla. Troškovnik je detaljno opisan na kraju ovog rada.

Ključne riječi: elektrifikacija, niskopodni minibus, Braunschweig ispitni vozni ciklus, razmještaj baterija, financijska isplativost

SUMMARY

According to the more present usage of electric vehicles that don't pollute the environment, this thesis will show the electrification of the conceptual low-floor minibus for public transport. The paper presents the dimensioning and selection of all components of the electric drive system and the determination of their most acceptable arrangement for the vehicle to have satisfying performances, more room for passengers, and from the drive and construction aspect the most optimal load. Needed capacity of the batteries is calculated using Braunschweig City Driving Cycle, and power of the electric motor using resistance force while driving in realistic conditions with ascents. All of this has to be financially viable, otherwise the whole idea is pointless. Cost book is described in detail at the end of this thesis.

Keywords: electrification, low-floor minibus, Braunschweig City Driving Cycle, arrangement of batteries, financial viability

1. UVOD

Budući da je u današnje vrijeme sve veća potražnja za vozilima koja ne zagađuju okoliš, odnosno zagađuju ga što manje, minibus je odlično rješenje za to. Naime, u manjim sredinama gdje je broj stanovnika i korisnika javnog prijevoza drastično manji, nego li je to u gradskim sredinama te također i u gradskim sredinama, točnije u strogom centru grada gdje veliki autobusi nemaju mjesta za manevriranje, nema potrebe, a nekada je i nemoguće koristiti velike autobuse koji zbog svojih dimenzija i masa kao i s većim brojem sjedećih, odnosno stajaćih mjesta, nisu prikladni za vožnju po navedenim lokacijama. Veliki autobusi zahtijevaju ugrađivanje velikih Diesellovih motora. Dakle radi se o motorima velike snage i obujma koji daleko više štete okolišu i uzaludno troše gorivo, a često je prostor za putnike gotovo prazan.

Minibusevi se već dugi niz godina koriste za transport manjeg broja ljudi. Njihov putnički kapacitet je manji od kapaciteta gradskog ili putničkog autobusa, ali veći od kapaciteta osobnog vozila.

1.1. Općenito o minibusevima

Prema europskom pravilniku [1], minibus je vozilo koje služi za prijevoz od osam do 16 ljudi iako neki proizvođači nude svoje minibuseve sa više sjedećih mjesta. Njegova vanjska duljina ne smije prelaziti osam metara. Najpoznatiji mikrobuses svih vremena je Volkswagen Type 2 koji se proizvodio od 1949. godine. Ovaj model je legenda u auto industriji, u 70-im godinama prošloga stoljeća, bio je omiljen među hipijima. Danas postoje klubovi obožavatelja ovog mikrobusesa diljem svijeta, vrijedna su roba među kolekcionarima.



Slika 1. Volkswagen Type-2 [2]

2. PRIMJERI MINIBUSEVA

Minibusevi se najčešće izrađuju preinakom dostavnih kombija. Takvi minibusevi mogu biti tvornički ili izrađeni u specijaliziranim radionicama. Naravno, u velikim tvornicama kao što su Volkswagen, Mercedes-Benz, Fiat, Ford itd., postoji već ciljana proizvodnja minibuseva, dakle ne radi se o preradi, već o proizvodnji. Gledano izvana, dostavni kombi i minibus se razlikuju jedino po tome da minibus ima prozore na bočnim stranicama. Svaki od navedenih proizvođača nudi svoje vozilo u različitim izvedbama. Dakle kupac odlučuje koliko sjedećih mjesta želi u putničkom prostoru. Specijalizirane radionice prerađuju dostavne kombije ili već gotove minibuseve po željama kupaca. Postoje čak i hrvatske tvrtke koje se bave preradama svih komercijalnih vozila pa tako i minibuseva. Jedna od poznatijih hrvatskih tvrtki je tvrtka *Unibox* [3]. Veliku važnost minibusevi imaju kod prijevoza osoba s invaliditetom. S bočne strane vozila ili na zadnjoj strani nalazi se rampa pomoću koje osobe s invaliditetom same mogu ući u vozilo pa se tu dolazi do važnosti niskopodnog minibusa. Niskopodni minibusevi nisu važni samo za osobe s invaliditetom, već i za starije osobe koje se teško kreću te za trudnice kojima je otežano uspinjanje po stepenicama.

Gore navedeni proizvođači minibuseva su ujedno i najčešći primjerci na cestama u Republici Hrvatskoj.

Na slici 2. se nalazi primjer minibusa prerađenog u britanskoj tvrtki *Excel Conversions Ltd.* [4] u vozilo za prijevoz osoba s invaliditetom. Kod zadnjih vrata je ugrađena rampa za podizanje invalidskih kolica.



Slika 2. Minibus prerađen za prijevoz osoba s invaliditetom [4]

2.1. Najčešći primjeri minibuseva u Republici Hrvatskoj

Tablica 1. Primjeri najčešćih minibuseva na prometnicama RH

	Mercedes-Benz Sprinter	Fiat Ducato	Volkswagen Crafter
Izvedbe	City: 35, 45, 45 RHD, 65, 65K, 77 Transfer: 23, 34, 35, 45, 55 Travel: 45, 55, 65 Mobility: 23, 33, 35, 45	Combi Panorama Shuttle Minibus	Crafter: 30, 35, 38.8, 40, 50, 55
Broj sjedećih mjesta	8-22 (10,12,13,16,17,18,19)	5-16 (6,8,9)	12-40 (14,16,17,18)
Ponuda motora	Jedan Dieslov motor OM 651, emisijeske razine Euro VI, zapremine 2143 cm ³ , 4 redna cilindra 3 varijante: 84 kW (300 Nm), 105 kW (330 Nm), 120 kW (360 Nm)	130 MultiJet (SCR)- zapremine 2287 cm ³ , 4 redna cilindra, snage 96 kW te 320 Nm okretnog momenta pri 1800 min ⁻¹ , emisijeske razine EURO VI 150 EcoJet- zapremine 2287 cm ³ , 4 redna cilindra, snage 109 kW te 380 Nm okretnog momenta pri 1500 min ⁻¹ , emisijeske razine EURO VI 140 Natural Power-zapremine 2999 cm ³ , 4 redna cilindra, snage 100 kW te 350 Nm okretnog momenta pri 1500 min ⁻¹ , emisijeske razine EURO VI 180 MultiJet- zapremine 2999 cm ³ , 4 redna cilindra, snage 130 kW te 400 Nm okretnog momenta pri 1400 min ⁻¹ , emisijeske razine EURO VI)	Jedan Dieslov motor, emisijeske razine EURO VI, zapremine 1968 cm ³ , dostupan u varijantama od 103 kW do 130 kW, te okretnog momenta od 340 Nm do 410 Nm
Vanjske dimenzije	Duljina: od 5926 mm do 8716 mm Širina: od 1993 mm do 2155 mm Visina: od 2620 mm do 2861 mm	Duljina: od 4963 mm do 6363 mm Širina: 2050 mm Visina: od 2254 mm do 2764 mm	Duljina: od 4890 mm do 7345 mm Širina: od 1840 mm do 2427 mm Visina: od 2355 mm do 2590 mm



Slika 3. Fiat Ducato Minibus [5]



Slika 4. Mercedes-Benz Sprinter Minibus [6]



Slika 5. Volkswagen Crafter Minibus [7]

2.2. Cacciamali Urby C65

Samim krajem 2008. godine, ZET (Zagrebački Električni Tramvaj) je po prvi puta na nekim određenim linijama uveo minibusove. Na linijama gdje nema potrebe za velikim autobusima zbog premalog broja putnika ili nemogućnosti prolaska uskim ulicama, u Zagrebu se prvenstveno radi o strogom centru grada, uvedeni su minibusi. Još jedan bitan razlog za njihovo uvođenje je u drugom planu, a radi se o potrošnji i cijeni. Skuplji i „rastrošni“ veliki autobusi su zamijenjeni s nešto povoljnijim i štedljivijim minibusovima. Prvi minibus koji je ZET kupio je minibus proizvođača Cacciamali model Urby C65. Dakle radi se o niskopodnom minibusu koji je nastao preradom kombija proizvođača Iveco, modela Daily, točnije ima njegovu šasiju, motor i mjenjač.

Tablica 2. Cacciamali Urby C65, tehnički podaci

Prostor za putnike	12 sjedećih mjesta, ukupno je u prostor za putnike moguće smjestiti 45 osoba
Pogonski motor	Dieselov, obujma 2998 cm ³ , snage 125 kW te 400 Nm okretnog momenta.
Vanjske dimenzije	Duljina: 7430 mm Širina: 2160 mm Visina: 3150 mm
Cijena	Oko 160,000 €
Prednosti / nedostaci	<p>Prednosti: zbog manjih dimenzija lakše prolazi manjim prometnicama, odnosno gradskom jezgrom te manja potrošnja goriva u odnosu na velike autobuse</p> <p>Nedostaci: u ponudi je samo ručni mjenjač, nedostaje automatska parkirna kočnica, sporo otvaranje vrata, prevelika buka, neudobnost za putnike</p>



Slika 6. Cacciamali Urby C65 [8]

2.3. Iveco Stratos LF 38 SPP

U 2015. godini, ZET je naručio 16 novih minibusu s Ottovim motorima pogonjenima na SPP (stlačeni prirodni plin). Proizvodi ih Iveco kao i njihove prethodnike i u mnogočemu su bolji od njih. Dakle Iveco Stratos LF 38 SPP je pogonjen na komprimirani prirodni plin, točnije metan CH₄. Metan je stlačen u spremniku pri tlaku od 200 bar pri temperaturi od 25 °C pri čemu jedna litra metana ima masu od 0,14 kg dok jedna litra dizelskog goriva ima masu od 0,83 kg. Najveći problem kod ovog vozila je njegova potrošnja. Vozači kažu da mogu preći maksimalno do 150 km s jednim spremnikom goriva. Na nekim rutama čak i puno manje oko 100 km te su ponekad u strahu da će ostati bez goriva uslijed vožnje.

Tablica 3. Iveco Stratos LF 38 SPP, tehnički podaci [9]

Prostor za putnike	14 sjedećih mjesta, ukupno je u prostor za putnike moguće smjestiti 38 osoba
Pogonski motor	Ottov, obujma 3000 cm ³ , snage 100 kW te 350 Nm okretnog momenta.
Autonomija	Do 150 km
Prednosti / nedostaci (u odnosu na Cacciamali Urby C65)	<p>Prednosti: više sjedećih mjesta, manje buke, udobniji, vrata se više ne otvaraju prema unutra, već su klizna, putnički prostor je klimatiziran</p> <p>Nedostaci: mjenjač stupnjeva prijenosa je i dalje ručni, manja snaga motora, mala autonomija</p>



Slika 7. Iveco Stratos LF 38 SPP [9]

2.4. Mellor Coachcraft Orion E

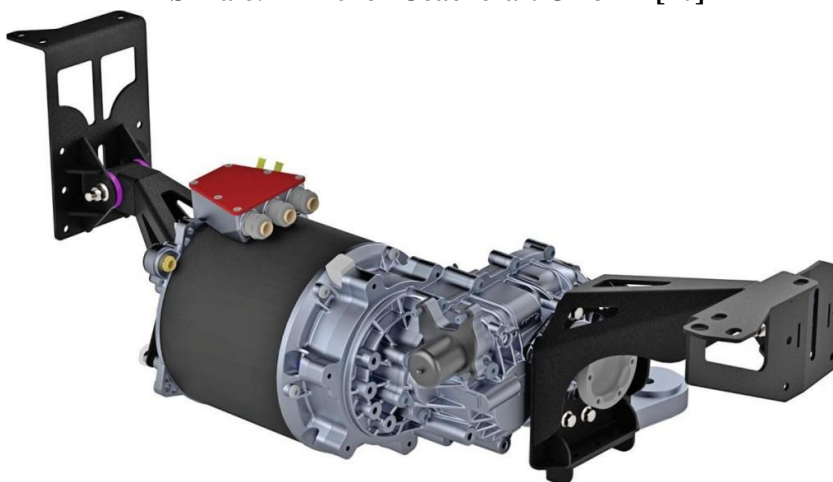
Ovo su bili primjeri nekih najčešćih minibusova koji voze na našim prostorima, no budući da su već sada neki europski gradovi počeli zabranjivati vozila s Diesellovim motorima, u njima takvi minibusi nemaju svjetlu budućnost jer je najčešće ugrađivani motor u njih baš Dieslov. Proizvođači će učiniti sve kako bi zadržali svoje mjesto na tržištu pa kao što smo vidjeli u slučaju Iveco Stratos 38 SPP, ugrađuju spremnike metana na svoja vozila jer po sadašnjem zakonu, vožnja na prirodni plin je dozvoljena u svim gradovima svijeta te je također moguće s njima ući u bilo koju garažu, dok to nije slučaj kod Diesellovog motora. Pitanje je samo kada će zakonodavstvo odlučiti da je vožnja na prirodni plin previše štetna za okoliš i zbog toga su danas sve više u trendu električna vozila kao što je i sama tema ovog završnog rada. Prvi svjetski primjer niskopodnog električnog minibusu je „Orion E“ tvrtke *Mellor coachcraft* [9], prikazan prvi put na sajmu komercijalnih vozila u travnju 2017. godine. Prednji kraj ovog vozila je iskorišten od Fiat-ovog modela Ducato ranije navedenog te je iskorišten pogonski sustav sa prednjim kotačima isto od navedenog modela. John Randerson, izvršni čovjek tvrtke *Mellor coachcraft* je htio da ovaj autobus ima kompaktnu izvedbu elektromotora i prijenosnog sustava kako bi se Dieslov motor iz Fiat-a što lakše mogao zamijeniti s elektromotorom. Dakle u ovom slučaju, elektromotor će se nalaziti naprijed. Elektromotor za ovaj niskopodni električni minibus je izradila nizozemska tvrtka *EMOSS*. Kod prototipa ovog vozila, baterije su smještene u dva odjeljenja na kraju putničkog prostora, dok su kod serijske proizvodnje smještene na krovu.

Tablica 4. Mellor Coachcraft Orion E, tehnički podaci [10]

Prostor za putnike	16 mjesta za sjedenje, u prostor za stajanje je moguće smjestiti 4 invalidska kolica
Baterije	Litij-željezo-fosfatne (LiFePO ₄) kapaciteta 72 kWh. Naponski sustav iznosi 400 V istosmjerne struje
Izlazna snaga	150 kW, najveći okretni moment iznosi 2500 Nm, za normalan rad je potrebno 1500 Nm
Maksimalna brzina	90 km/h
Autonomija	160 km
Trajanje punjenja	3 h i 30 min, ali postoji i opcija brzog punjenja u trajanju od 1 h i 30 min
Dimenzije	Duljina: 7479 mm Širina: 2200 mm Visina: 2645 mm



Slika 8. Mellor Coachcraft Orion E [10]



Slika 9. Kompaktni pogonski sustav tvrtke EMOSS [10]

2.5. Optare Solo EV

Tvrtka *Optare* postoji već više od jednog stoljeća, sjedište se nalazi u Ujedinjenom Kraljevstvu, do sada su proizveli više od 10,000 vozila tako da se kod ove tvrtke ne govori samo o konceptima kao kod nekih manje poznatih tvrtki, već o stvarnoj proizvodnji. Naziv Solo je dobiven od engleske skraćenice (engl. *Solo- so low*). Model je 2009. godine dobio nagrade za najveće napretke u proizvodnji električnih vozila kojima se smanjuje onečišćenje okoliša, ali i mnoge druge nagrade [11].

Tablica 5. Optare Solo EV; tehnički podaci [11]

Prostor za putnike	37 mjesta za sjedenje, ukupno je moguće smjestiti 58 putnika
Baterije	Litij-željezo-magnezij-fosfatne (LiFeMgPO ₄) kapaciteta 138 kWh (dodatna opcija 180 kWh)
Elektromotor	150 kW, najveći okretni moment iznosi 2000 Nm
Maksimalna brzina	Ograničena na 90 km/h
Autonomija	Ovisno o paketu baterija, od 150 km do 250 km
Trajanje punjenja	6 h, ali postoji i opcija brzog punjenja u trajanju od 2 h i 30 min
Dimenzije	Duljina: od 9200 mm do 9900 mm Širina: 2340 mm Visina: 2885 mm



Slika 10. Optare solo EV [11]

2.6. Solaris Urbino 8,9

Solaris je poljska tvrtka koja postoji od 1996. godine. Proizvode autobuse, minibus, trolejbuse pa čak i neka željeznička vozila. Električni minibus pod nazivom *Urbino 8,9* je 2017. godine osvojio nagradu za minibus godine. Budući da masa baterija za pokretanje ovog minibus iznosi 1400 kg, koje su smještene u zadnjem kraju, u tvornici su morali poprilično voditi računa o tome da sve ostalo u unutrašnjosti teži što manje. Tako su bočne oplata ovog minibus napravljene od ugljičnih vlakana. Čak su korištena stakla manje debljine, nego li su na modelu sa Dieslovim motorom. Za strop nisu korištene šperploče već drvo mahagonija.

Tablica 6. Solaris Urbino 8,9; tehnički podaci [12]

Prostor za putnike	24 mjesta za sjedenje, ovisno o razmještaju vrata i baterija
Baterije	Litij-Ionske (Li-Ion) kapaciteta 120,9 kWh, napona 600 V, kućište baterija hlađeno tekućinom
Elektromotor	Asinkroni, snage 120 kW (opcija i 160 kW) najvećeg okretnog momenta 1400 Nm
Maksimalna brzina	Ograničena na 50 km/h
Autonomija	100 km
Trajanje punjenja	4 h
Dimenzije	Duljina: 8950 mm Širina: 2400 mm Visina: 3250 mm



Slika 11. Solaris Urbino 8,9 [13]

2.7. Manji primjeri minibuseva

2.7.1. Rampini Wolta

Španjolski proizvođač *Rampini* nudi jedan od rijetkih potpuno električnih minibuseva na tržištu koji nisu nastali preradom nekog kombija, već je cijeli napravljen od početka. Pokreće ga Siemens-ov trofazni asinkroni motor. Baterije su smještene u krovu s čime je dobiveno više mjesta za putnike.

Tablica 7. Rampini Wolta; tehnički podaci [14]

Prostor za putnike	11 mjesta za sjedenje, ukupno stanu 33 putnika
Baterije	Litij-željezo-fosfatne (LiFePO ₄), kapaciteta 100 kWh, napona 600 V, kućište baterija hlađeno tekućinom
Elektromotor	Siemens-ov asinkroni, snage 67 kW, najvećeg okretnog momenta 200 Nm
Maksimalna brzina	Ograničena na 60 km/h
Autonomija	150 km
Trajanje punjenja	2 h
Dimenzije	Duljina: 6000 mm Širina: 2100 mm Visina: 2980 mm



Slika 12. Rampini Wolta [14]

2.7.2. ZEUS M 200 E

Ovaj minibus je jedan od rijetkih primjera minibusu koji se uspio probiti na današnjem tržištu električnih vozila za javni prijevoz putnika. Može ga se vidjeti u nekim velikim europskim gradovima poput Amsterdama, Ženeve, Praga i Pariza. ZEUS (engl. *Zero Emission Urban Bus System*) za vožnju koristi asinkroni motor. Zanimljivost kod ovog minibusu je u tome da se baterije nalaze na podu kod stražnjih vrata te ih je s lakoćom moguće izvaditi i zamijeniti s napunjenim baterijama.

Tablica 8. ZEUS M 200 E; tehnički podaci [15]

Prostor za putnike	11 mjesta za sjedenje, ukupno stanu 22 putnika
Baterije	Litij-ionske (Li-Ion), kapaciteta 100 kWh, napona 600 V, kućište baterija hlađeno tekućinom
Elektromotor	Asinkroni, snage 60 kW, najvećeg okretnog momenta 260 Nm
Maksimalna brzina	Ograničena na 45 km/h
Autonomija	120 km
Trajanje punjenja	10 h
Dimenzije	Duljina: 5890 mm Širina: 2070 mm Visina: 2595 mm



Slika 13. ZEUS M 200 E [15]

2.8. Kratki zaključak o prikazanim električnim minibusevima

Iz prikazanih primjera minibuseva se može zaključiti da se u njima za pogon pretežito koriste asinkroni (indukcijski) elektromotori. Glavni razlog za njihovo korištenje je jednostavnost njihove konstrukcije, ali još važniji razlog je njihova pouzdanost. Brzina vrtnje rotora je različita od brzine okretanja statorskog polja iz čega je i izveden naziv asinkroni. Razlika brzina, takozvano klizanje, je ključna veličina kod prijenosa energije u elektromotoru. Klizanje kod asinkronih motora je pojava, da se rotor vrti brzinom vrtnje, koja je uvijek manja od sinkrone, to jest manja je od brzine vrtnje okretnog magnetskog polja. Baterije su najčešće litij-ionske (Li-Ion), točnije litij-željezo-fosfatne (LiFePO_4) o čemu će biti još riječi kasnije.

3. BRAUNSCHWEIG CIKLUS I KONCEPT ELEKTRIČNOG MINIBUSA

3.1. Braunschweig gradski ispitni vozni ciklus

Glavna tema ovog završnog rada je analizirati i odrediti energetske potrebe gradskog minibusa s električnim pogonskim sustavom za standardni ispitni ciklus za autobuse. Braunschweig-ov ispitni ciklus je razvijen na Tehničkom sveučilištu u Braunschweigu kako bi simulirao vožnju gradskog autobusa s čestim stajanjima. Slična situacija je i u zagrebačkom prometu, odnosno u svim većim gradovima. Iako je razvijen još 1970-ih godina, još uvijek se vrlo često primjenjuje u ispitivanjima autobusa namijenjenih javnom gradskom prijevozu. Brzina vozila u ovisnosti o proteklom vremenu je prikazana dijagramom na slici 14.

Art.Kinema je aplikacija koju je razvila švicarska organizacija *Infras*, a aplikacija služi za analizu ciklusa kroz više od 30 parametara pa će se tako i Braunschweig- ispitni ciklus razmatrat kroz odabrane parametre bitne za ovaj rad. Ti parametri su dani u tablici 10.



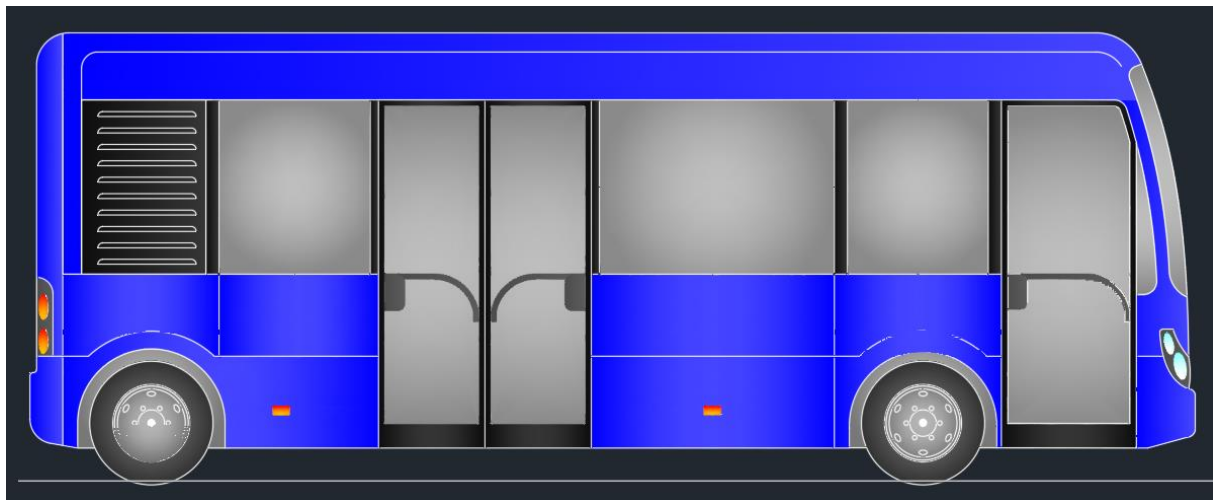
Slika 14. Dijagram brzine u ovisnosti o vremenu za Braunschweig ispitni vozni ciklus

Tablica 9. Art.Kinema parametri za Braunschweig gradski ispitni vozni ciklus [16]

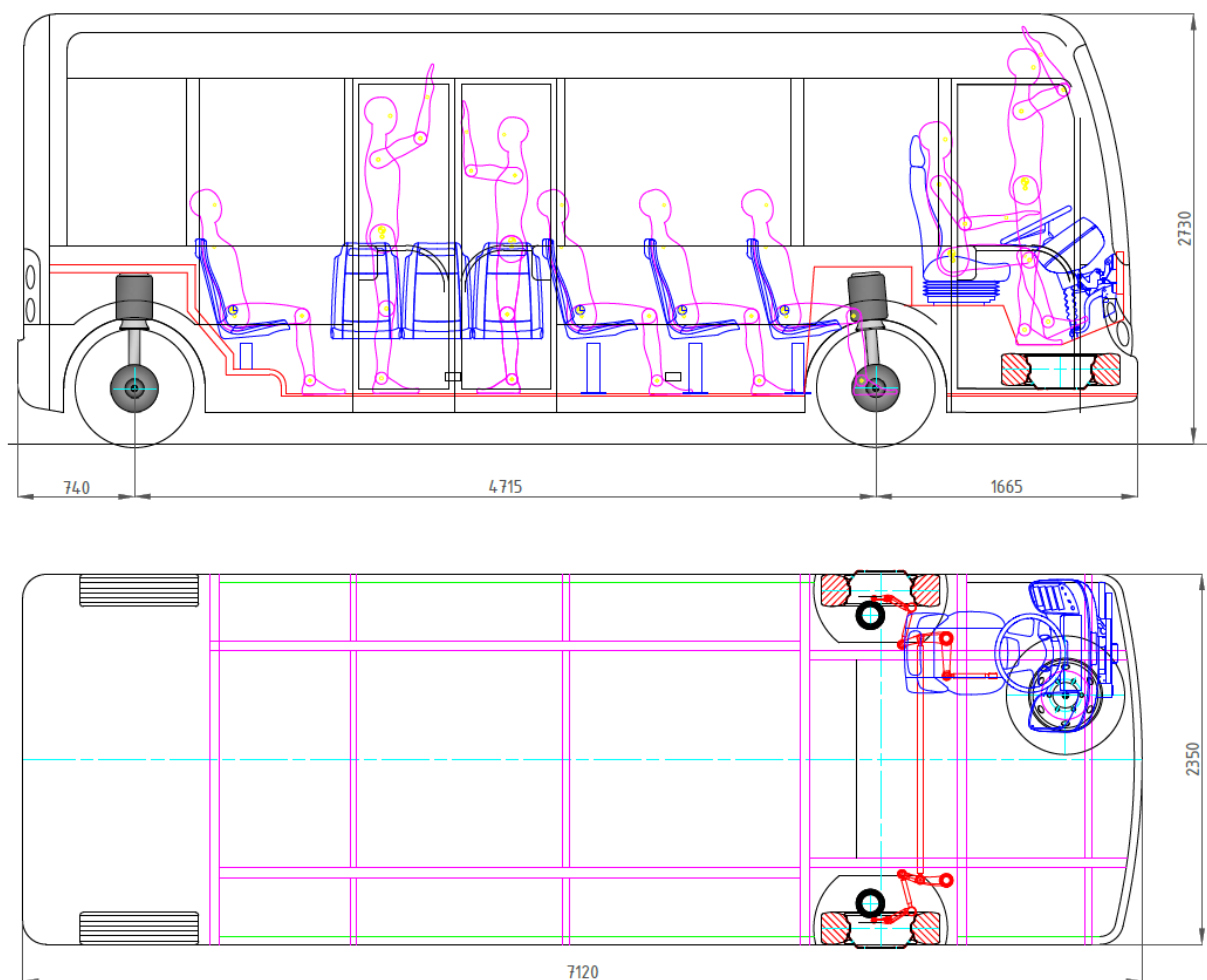
Grupa	Parametar	
Vezano za udaljenost	Ukupna udaljenost	10900,32 m
Vezano za vrijeme	Ukupno vrijeme	1740 s
	Vrijeme vožnje	1452 s
	Vrijeme utrošeno na ubrzavanje	712 s
	Vrijeme utrošeno na usporavanje	495 s
	Vrijeme utrošeno na kočenje	369 s
	Vrijeme stajanja	288 s
Vezano za brzinu	Prosječna brzina (sa stajanjima)	22,6 km/h
	Prosječna brzina vožnje	27,03 km/h
	Najveća brzina	58,21 km/h
Vezano za ubrzanje	Prosječno pozitivno ubrzanje	0,424 m/s ²
	Prosječno negativno ubrzanje	-0,595 m/s ²
	Broj ubrzanja	52
	Broj ubrzanja po kilometru	4,771 /km
Vezano za stajanje	Broj stajanja	26
	Broj stajanja po kilometru	2,39 /km
	Prosječno vrijeme stajanja	11,08 s
	Prosječna udaljenost između stajanja	419,24 m

3.2. Koncept minibusa, projekt Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu

Zadatak ovog završnog rada je odabrati elektromotor i baterije adekvatne za pogon konceptualnog minibusa prikazanog na slici 15. te uz pomoć dijagrama i proračuna utvrditi isplati li se izraditi takvo vozilo. Već unaprijed je potpuno jasno da ovakav minibus u gradu Zagrebu sa infrastrukturom kakva trenutno je ne može zadovoljiti potrebe većine linija jer ne postoje punionice električne energije na okretištima. Osnovni problem su njegove dimenzije, dakle čak i kada kapacitet baterija, odnosno njihova masa ne bi bili problem, zbog premalo prostora za putnike, ovaj minibus ne bi zadovoljavao neke linije u gradu Zagrebu. S druge strane ovaj minibus ionako nije zamišljen da vozi na dugačkim i prometnim linijama kao što su npr. ZET-ova linija 109 koja je jedna od najdužih u gradu Zagrebu jer bi za prijevoz svih ljudi na toj liniji u jednom danu, zbog jako velikog iznosa energije koja se troši na vožnju, baterije trebale biti toliko velike da bi se drastično smanjio prostor za putnike pa bi minibus brzo izgubio smisao. Svrha ovog minibusa je prijevoz manjeg broja putnika na manje prometnim linijama u gradu i van grada, odnosno na linijama u podsljemenskoj zoni ili noćnim linijama. Dapače ovakav minibus bi izvrsnu primjenu pronašao u Dalmaciji van turističke sezone ili u Hrvatskom Zagorju, Prigorju i slično.



Slika 15. Koncept minibusa Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu



Slika 16. Dimenzije minibusa

4. ODREĐIVANJE POGONSKOG SUSTAVA MINIBUSA

4.1. Energetske potrebe gradskog minibusa s električnim pogonskim sustavom

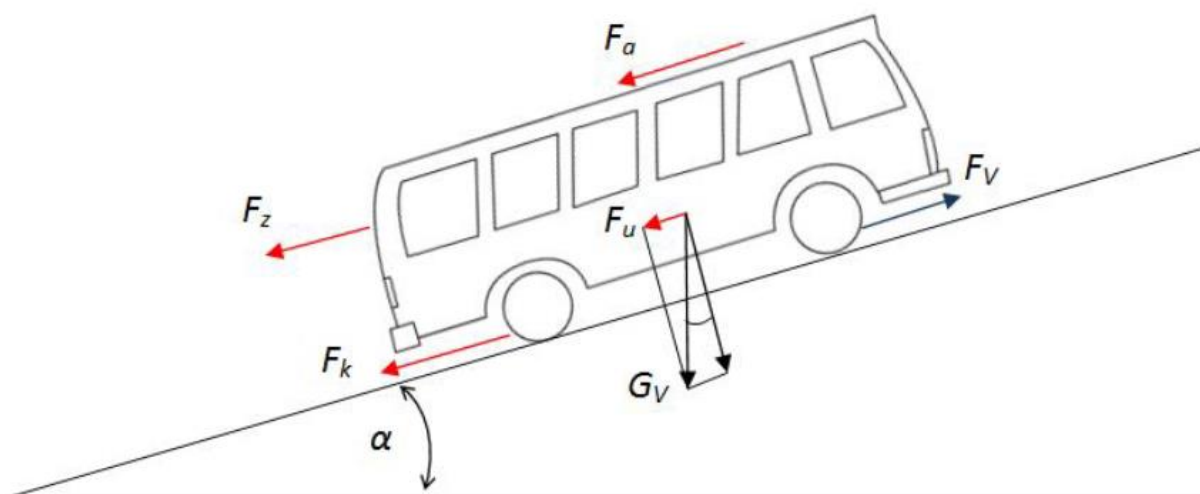
Da bi se mogle odabrati baterije za vožnju minibusa koje bi zadovoljavale eksploatacijske uvjete, potrebno je izračunati energetske potrebe. Energetske potrebe će se izračunati pomoću programa *Microsoft Office Excel* na način da će se vozilo konstantno voziti po Braunschweig ispitnom voznom ciklusu u periodu od 8 sati. Za vrijeme vožnje na vozilo djeluju određeni otpori vožnje pomoću kojih će se izračunati energetske potrebe, a to su: otpor kotrljanja, otpor vjetra, otpor uspona i otpor ubrzanja. Braunschweig ispitni vozni ciklus traje 1740 sekundi što iznosi 29 minuta. Dakle to je trajanje jedne vožnje. Nakon svake vožnje slijedi stajanje na okretištu u trajanju od 10 minuta. Nakon jednostavnog izračuna se dobije da jedan ciklus vožnje sa stajanjem traje 39 minuta. U jednom radnom danu od 8 sati, vozilo 12 puta prijeđe liniju, odnosno 6 puta prijeđe liniju u jednom i drugom smjeru. Drugim riječima, vozilo u jednom danu prijeđe 131 km. Izračun potrebne energije za svladavanje otpora vožnje iz poglavlja 4.2 je proveden pomoću podataka iz tablice 10.

Tablica 10. Ulazni podaci konceptualnog minibusa

ULAZNI PODACI		
PARAMETAR	OZNAKA	VRIJEDNOST
Masa praznog vozila [kg]	m_v	7000
Masa tereta [kg]	m_t	2000
Ukupna masa vozila [kg]	m_u	9000
Čeona površina [m ²]	A	6,5467
Koeficijent otpora zraka [-]	c_w	0,4
Faktor otpora kotrljanja [-]	f_{kot}	0,008
Faktor rotirajućih masa [-]	k_m	1,05
Gravitacija [m/s ²]	G	9,81
Gustoća zraka [kg/m ³]	P	1,204
Dinamički polumjer kotača [m]	r_{din}	0,3647

4.2. Otpori vožnje

Tijekom vožnje vozila, prisutni su određeni otpori koji otežavaju gibanje vozila. Da bi se vozilo moglo kretati, potrebno je da vučna sila (F_v) bude veća od sila otpora vožnje. Najbitnije sile otpora za računanje potrebne snage elektromotora su: sila otpora zraka (F_z), sila otpora uspona (F_u), sila otpora kotrljanja (F_k) i sila otpora ubrzanja (F_a). Sve sile koje djeluju na vozilo, a korištene su za proračun su prikazane na slici 17.



Slika 17. Sile otpora vožnje koje djeluju na vozilo za vrijeme vožnje

4.2.1. Sila otpora kotrljanja

Otpor kotrljanja je posljedica gubitka energije koji nastaju prvenstveno uslijed stalnog deformiranja gume kotača prilikom kotrljanja po podlozi. Sila otpora kotrljanja se računa prema formuli:

$$F_k = f_k \cdot m_{uk} \cdot g \cdot \cos(\alpha), [\text{N}] \quad (4.1)$$

Iz formule se može uočiti da sila otpora kotrljanja pada s porastom kuta nagiba ceste, no kod Braunschweig ispitnog voznog ciklusa se ne uzima uspon u obzir. Faktor otpora kotrljanja (f_k) ovisi o vrsti gume i vrsti podloge, a za gume teretnog vozila na asfaltu iznosi od 0,006 do 0,01. Odabire se srednja vrijednost 0,008.

4.2.2. Sila otpora zraka

Otpor zraka je posljedica gubitka energije koji nastaju uslijed gibanja vozila kroz zrak. Na iznos otpora zraka utječu samo oblik vozila i brzina vožnje. Formula prema kojoj se računa sila otpora zraka glasi:

$$F_z = \rho_z \cdot \frac{(v + v_0)^2}{2} \cdot c_w \cdot A, [\text{N}] \quad (4.2)$$

Za gustoću zraka (ρ_z) se uzima vrijednost od $1,204 \text{ kg/m}^3$. Kod vožnje bez protuvjetera se gubi član (v_0). Faktor otpora zraka (c_w) ovisi o obliku vozila te je za ovaj autobus odabrana vrijednost od 0,4. Čeona površina (A) vozila je zapravo projekcija vozila na zidu koja bi se dobila kada bi se paralelne zrake svjetlosti usmjerile u prednji kraj vozila.

4.2.3. Sila otpora uspona

Na iznos sile otpora uspona utječu masa vozila i nagib podloge. Povećanjem kuta uspona se povećava i sila otpora uspona. Sila otpora uspona se računa prema formuli:

$$F_u = m_v \cdot g \cdot \sin(\alpha), [\text{N}] \quad (4.3)$$

Uspona u Braunschweig ispitnom ciklusu nema, a navedeni izraz će se koristiti kao jedan od kriterija za odabir motora.

4.2.4. Sila otpora ubrzanja

Ovaj otpor se javlja u nestacionarnim uvjetima rada, tj. posljedica je inercijskih sila kod ubrzanja. Mogućnost ubrzanja vozila određuje se iz snage koja je preostala nakon svladavanja osnovnih (stacionarnih) otpora. Formula prema kojoj se računa sila otpora ubrzanju glasi:

$$F_a = m_v \cdot a, [\text{N}] \quad (4.5)$$

Pri čemu se akceleracija (a) pomoću brzine (v) računa svake sekunde prema Braunschweig ispitnom voznom ciklusu.

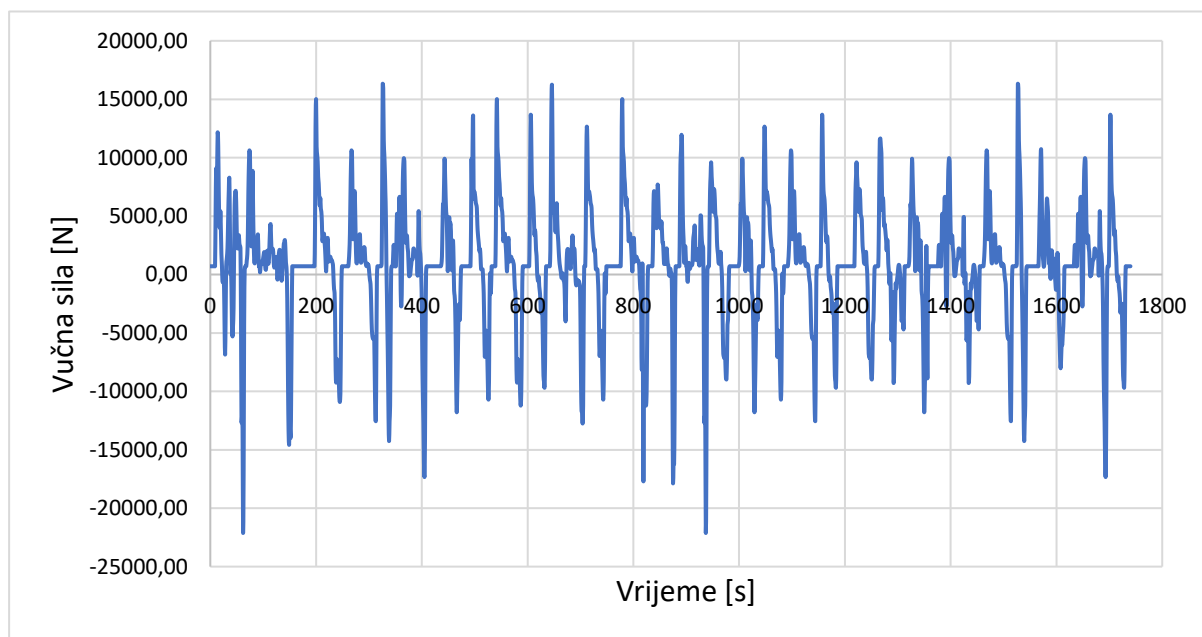
4.2.5. Vučna sila, potrebna snaga i moment elektromotora

Vučna sila (F_v) mora biti ili jednaka ili još poželjnije veća od ukupnih sila otpora, ali s druge strane ne smije biti veća od najveće sile prijanjanja. Dakle minimalna potrebna vučna sila iznosi:

$$F_v = F_k + F_z + F_u + F_a, [\text{N}] \quad (4.6)$$

Drugim riječima, vučna sila (F_v) proizlazi iz okretnog momenta motora, koji se preko elementa prijenosa snage (transmisije) dovodi pogonskim kotačima, dijagram vučne sile u ovisnosti o vremenu se nalazi na slici 18.

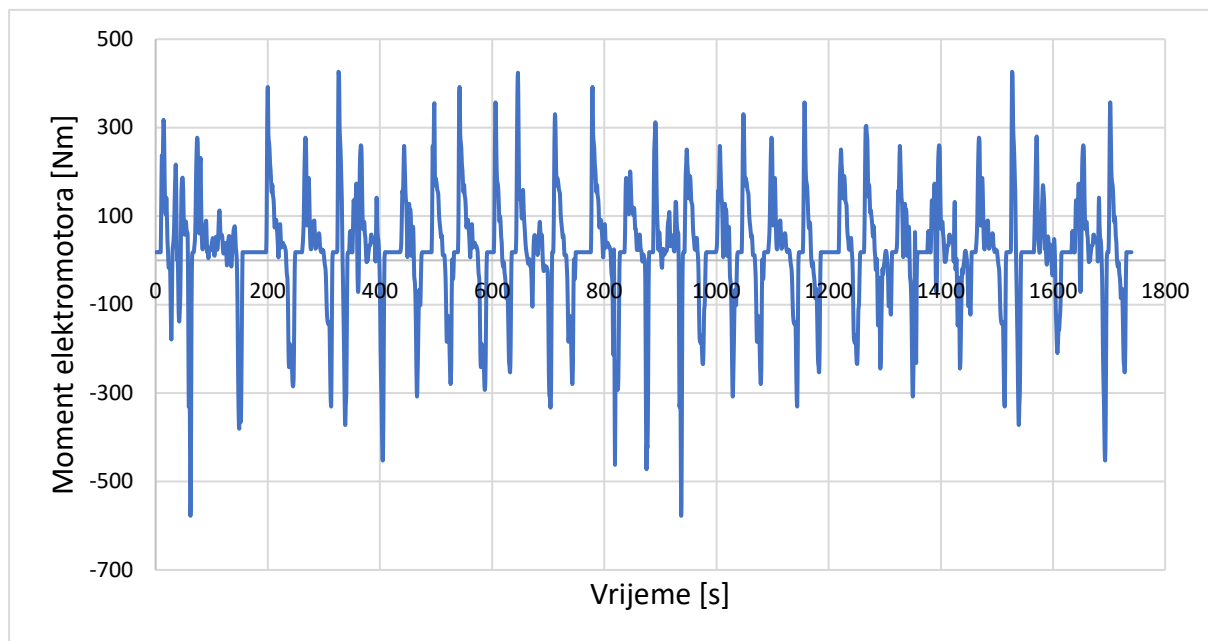
$$F_v = \frac{M_p}{r_d}, [\text{N}] \quad (4.7)$$



Slika 18. Dijagram vučne sile u ovisnosti o vremenu

Pa iz toga proizlazi formula za računanje okretnog momenta potrebnog na kotačima (4.8), dijagram momenta elektromotora u ovisnosti o vremenu je prikazan na slici 19.

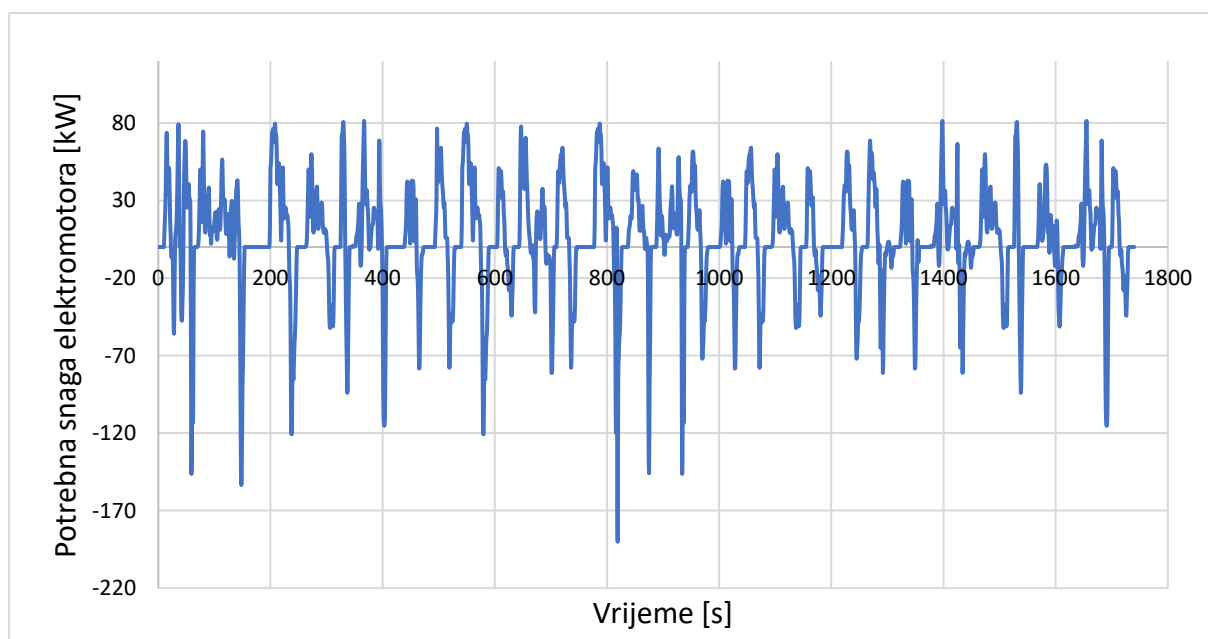
$$M_p = F_v \cdot r_d, [\text{Nm}] \quad (4.8)$$



Slika 19. Dijagram potrebnog momenta elektromotora u ovisnosti o vremenu

Snaga potrebna na kotačima za pogon vozila se računa prema formuli (4.9), a dijagram potrebne snage elektromotora u ovisnosti o vremenu je prikazan na slici 20.

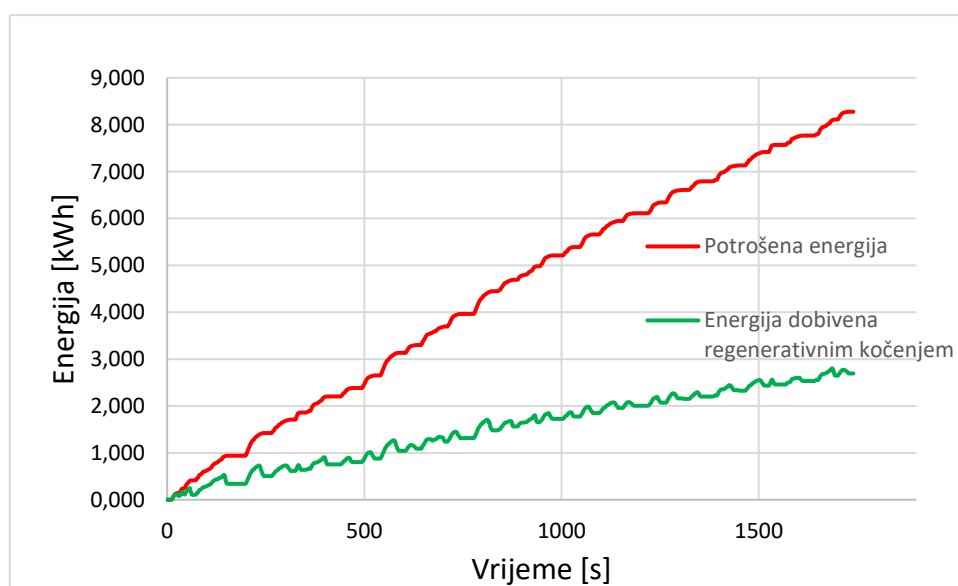
$$P_{kot} = F_v \cdot v, [\text{kW}] \quad (4.9)$$



Slika 20. Dijagram potrebne snage elektromotora u ovisnosti o vremenu

4.3. Potreban kapacitet baterija

Ako se uzme u obzir da iskoristivost elektromotora iznosi otprilike 90 %, nakon provedenog proračuna se dobije da je potrebno 8,3 kWh energije za odvoziti liniju, odnosno Braunschweig ispitni vozni ciklus pri čemu je uzeto u obzir da je vozilo puno (maksimalan broj putnika). Kada se iznos te energije pomnoži s ukupnim brojem linija koje vozilo (njih 12) prijeđe u danu, dobije se da je potreban kapacitet baterija oko 100 kWh. Upotrebom regenerativnog kočenja se jedan dio kinetičke energije kočenja uspije „spasiti“ i vratiti u baterije. Prikaz energije potrebne za vožnju prema Braunschweig ispitnom voznom ciklusu te energije koja se dobije regenerativnim kočenjem se nalazi na slici 18. Iznos energije dobivene regenerativnim kočenjem iznosi 2,69 kW/h što iznosi oko 32 % potrošene energije pa bi se prema tome mogle koristiti baterije s manjim kapacitetom, no minibus ne vozi uvijek prema Braunschweig ispitnom voznom ciklusu gdje ima toliko kočenja. Na dionicama bez kočenja, odnosno sa manjim brojem kočenja, iznos dobivene energije regenerativnim kočenjem je značajno manji pa se nije uvijek moguće osloniti na to da će se jedan dio energije vratiti.



Slika 21. Potrošena energija i energija dobivena regenerativnim kočenjem tijekom vožnje Braunschweig ispitnim voznim ciklusom

4.4. Odabir elektromotora

Da bi se odabrao adekvatan elektromotor za vožnju, potrebno je zadovoljiti određene kriterije. Kao glavni kriteriji, za izračun se koriste najveći nagib koji je potrebno svladati pritom vozeći zadovoljavajućom brzinom, a da autobus ne bude prespor, najveće ubrzanje koje je potrebno ostvariti prema Braunschweig ispitnom voznom ciklusu te maksimalna zahtijevana brzina koju vozilo mora ostvariti. Kad se izračuna snaga potrebna na kotačima, onda je potrebno uzeti u obzir i gubitke u diferencijalu preko kojeg se snaga vodi na kotače. Dakle mehanički stupanj djelovanja (η_m) za ovaj slučaj će iznositi 0,96 pa je potrebno odrediti snagu elektromotora prema formuli:

$$P_{EM} = \frac{P_{kot}}{\eta_m}, [\text{kW}] \quad (4.10)$$

Glavni kriteriji za odabir potrebne snage elektromotora su:

- a) kriterij maksimalne brzine (prema realnoj situaciji),
- b) kriterij maksimalnog ubrzanja (prema Braunschweig ispitnom voznom ciklusu),
- c) kriterij maksimalnog uspona (prema realnoj situaciji).

4.4.1. Kriterij maksimalne brzine

Nakon provedenih izračuna su dobiveni podaci da je kriterij maksimalne brzine, tj. snaga potrebna za postizanje maksimalne brzine zanemariva u odnosu na druga 2 kriterija. Snaga koja je potrebna autobusu da ostvari najveću brzinu od 58,2 km/h koja se razvija kod Braunschweig ispitnog voznog ciklusa iznosi samo 18 kW. Dakle uočava se da kriterij maksimalne brzine prema Braunschweig ispitnom voznom ciklusu nije adekvatan jer na nekim prometnicama izvan grada gdje to ograničenje dopušta, nema smisla da se vozilo ne kreće brže. U realnim situacijama kad bi se odredilo da je najveća brzina koju bi autobus mogao razviti npr. 90 km/h, bila bi potrebna snaga od 44 kW. Tek pri brzini od 120 km/h se kriterij maksimalne brzine drastično približava prema druga 2 kriterija.

4.4.2. Kriterij maksimalnog ubrzanja

Snaga potrebna za ostvarivanje najvećeg ubrzanja vozeći Braunschweig ispitnim voznim ciklusom iznosi 81 kW. Ovaj podatak će se koristiti samo kao referenca kod odabira elektromotora za vožnju jer ispitna ubrzanja odgovaraju realnim ubrzanjima na gradskim prometnicama. Situacija kad je potrebno postići veće ubrzanje je npr. kod uključivanja na glavnu prometnicu s autobusne postaje kada je gust promet, kako se ne bi stvorila gužva na cesti.

4.4.3. Kriterij maksimalnog uspona

Kao što je već ranije spomenuto, kod Braunschweig ispitnog voznog ciklusa nema uspona, što nikako nije realna situacija, barem ne u Republici Hrvatskoj na prometnicama. Za najveći uspon će se uzeti vrijednost od 12 % po kojem se minibus može kretati duže vrijeme bez preopterećenja elektromotora, naravno vozeći pritom nekom prihvatljivom brzinom koja će iznositi 35 km/h. Za ovakve uvjete vožnje je potrebna snaga elektromotora nešto malo veća nego kod kriterija maksimalnog ubrzanja, a iznosi 89 kW. Kontinuirana snaga potrebna za svladavanje uspona od 12 % pri brzini vožnje od 35 km/h će biti jedan od kriterija kod odabira elektromotora. Također potrebno je da odabrani elektromotor uz kratkotrajno preopterećenje može svladati uspon od 30 % u podsljemenskoj zoni pritom vozeći brzinom od 20 km/h. To je kriterij pri kojemu se javljaju najveće vučne sile koje će se koristiti kod računanja potrebnog momenta na kotaču, odnosno ukupnog prijenosnog odnosa transmisije kasnije. Za ovaj slučaj je potrebna snaga elektromotora u iznosu od 117,5 kW.

4.5. Odabrani elektromotor

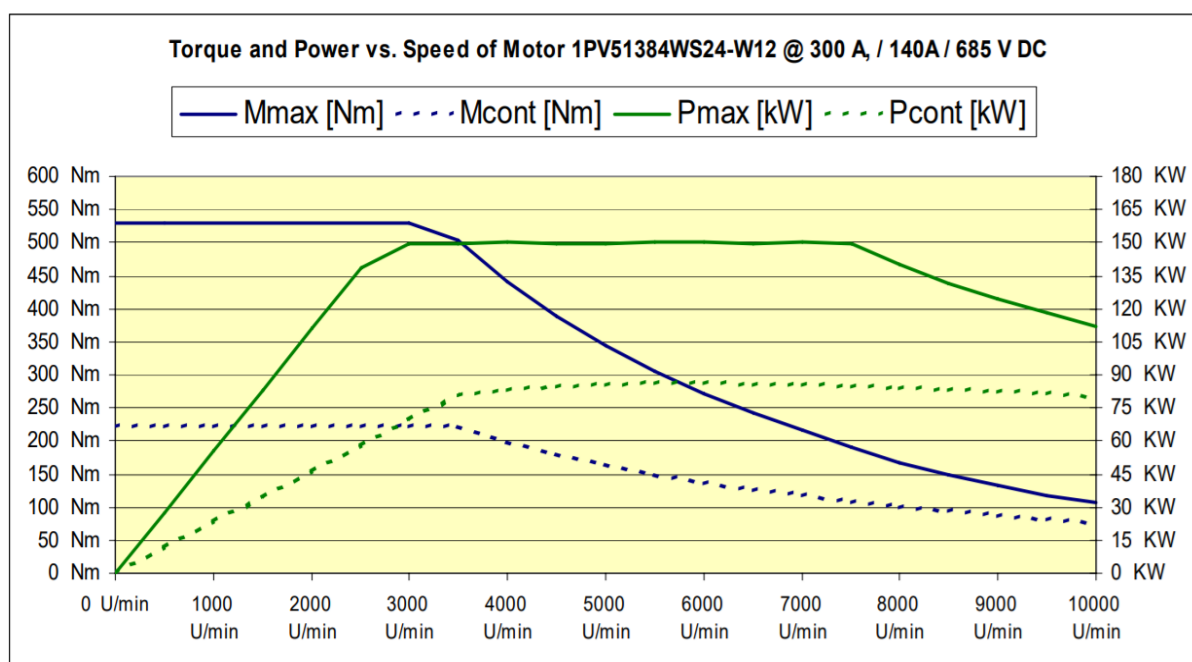
Prema izračunatim otporima vožnje, odnosno snazi koja je potrebna za vožnju minibusu, odabire se pogonski elektromotor. Dakle minimalna potrebna kontinuirana snaga elektromotora iznosi 44 kW, snaga potrebna za ostvarivanje najvećeg ubrzanja iznosi 81 kW, snaga potrebna za ostvarivanje uspona od 12 % pri brzini vožnje od 35 km/h iznosi 89 kW, dok potrebna vršna snaga za svladavanje uspona od 30 % pri brzini vožnje od 20 km/h iznosi 117 kW. Prema navedenim kriterijima se odabire asinkroni tj. induksijski elektromotor *Drive Motor IPV5138-4WS24* [18] (Slika.22), kojeg proizvodi tvrtka *Siemens*. Podaci o pogonskom elektromotoru se nalaze u tablici 11.

Tablica 11. Podaci o elektromotoru [18]



Slika 22. Drive motor 1PV5138-4WS24, Siemens [18]

Tip elektromotora	Asinkroni motor
Medij za hlađenje	Smjesa vode i etilen glikola
Nazivni napon	650 V izmjenične struje
Nazivna snaga	85 kW
Vršna snaga	150 kW
Nazivni moment	220 Nm
Maksimalni moment	530 Nm pri 300 A
Nazivna struja	142 A
Maksimalna brzina vrtnje	10 000 min ⁻¹
Masa	120 kg
Dimenzije	510 x 245 x 245 mm



Slika 23. Dijagram momenta i snage u ovisnosti o brzini vrtnje [18]

Iz dijagrama na slici 23. se uočava da nazivna snaga elektromotora iznosi 85 kW te ako se opet pogledaju poglavlja 4.3.1., 4.3.2. i 4.3.3. primjećuje se da je već nazivna snaga elektromotora dovoljna za svladavanje svih otpora vožnje. Rezerva snage između nazivne snage i vršne snage će se koristiti za svladavanje većih uspona od 12 %.

4.6. Transmisija

Budući da se okretni moment elektromotora pomoću diferencijalnog prijenosnika prenosi na kotače, potrebno je izračunati koliki je maksimalni moment koji se prenosi na kotače. Drugim riječima, pomoću maksimalne vučne sile ($F_{v,max}$) od 20307 N, koja je potrebna za svladavanje uspona od 30 % pri brzini od 20 km/h i dinamičkog polumjera kotača (r_d) će se prema izrazu (4.11) izračunati potreban moment na pogonskim kotačima.

$$M_p = F_{v,max} \cdot r_d = 7406 \text{ Nm} , \quad (4.11)$$

Omjer maksimalnog prijenosnog okretnog momenta M_p i maksimalnog, odnosno vršnog momenta elektromotora M_{max} će odrediti koliko iznosi ukupan potrební prijenosni omjer transmisije (i_{uk}). Također, potrebno je uzeti u obzir gubitke u transmisiji, odnosno mehanički stupanj djelovanja transmisije (η_m) koji će u ovom slučaju iznositi 0,96. Dakle ukupni prijenosni omjer transmisije (i_{uk}) će se izračunati pomoću izraza (4.12).

$$i_{uk} = \frac{M_p}{M_{max} \cdot \eta_m} = 14,55 \quad (4.12)$$

Jedan od zahtjeva ranije naveden, koje vozilo mora zadovoljiti je postizanje brzine od 90 km/h na cesti bez uspona. Maksimalna brzina vrtnje elektromotora ($n_{el,max}$) pri kojoj je vršna snaga još uvijek konstantna iznosi 7500 min^{-1} . Pomoću izraza (4.13) i koristeći prijenosni omjer izračunat u izrazu (4.12) će se izračunati maksimalna brzina koju vozilo trenutno može postići:

$$v_{max} = \frac{n_{el,max} \cdot \pi}{i_{uk} \cdot 30} \cdot r_{din} \cdot 3,6 = 70,8 \text{ km/h} \quad (4.13)$$

4.6.1. Mjenjač s 2 stupnja prijenosa

Iz izraza (4.13) se uočava da vozilo s ovim prijenosnim omjerom nije u mogućnosti postići traženu brzinu od 90 km/h te će biti potrebno ugraditi dodatne stupnjeve prijenosa. Budući da konceptualno vozilo u koje se ugrađuje elektromotor još nema diferencijalni prijenosnik snage, onda će se odabrati diferencijalni prijenosnik s prijenosnim omjerom 4,5 ($i_{or}=4,5$). Iz izraza (4.13) se izračunava potreban prijenosni omjer prvog stupnja prijenosa:

$$i_{uk} = i_{or} \cdot i_{m,I}, [-] \quad (4.13)$$

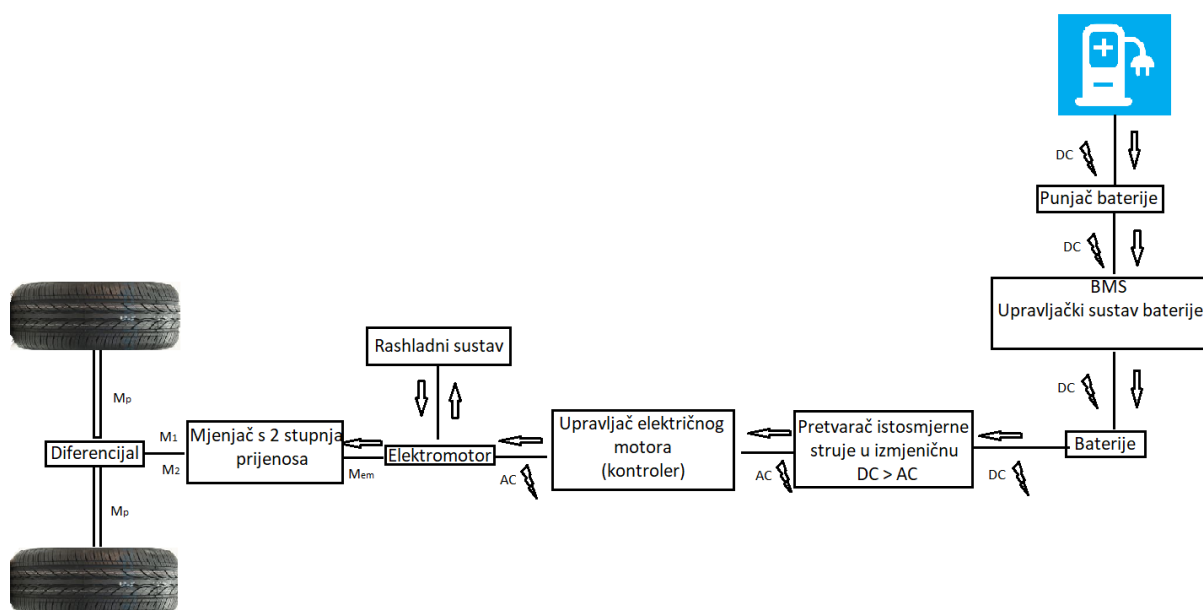
Nakon izračuna se dobiva da prijenosni omjer prvog stupnja prijenosa ($i_{m,I}$) iznosi 3,23. Da bi vozilo imalo 2 stupnja prijenosa koja pružaju vozilu povoljne vozne karakteristike, potrebno je izračunati prijenosne omjere koji zadovoljavaju sve tražene zahtjeve, dakle prva brzina se koristi za kretanje po cestama s velikim usponom, dok će druga brzina služiti za ostvarivanje najveće potrebne brzine. Koristeći izraz (4.12) se dobije da potreban prijenosni omjer drugog stupnja prijenosa ($i_{m,II}$), kako bi se postigla brzina od 90 km/h iznosi 2,4.

Tablica 12. Prijenosni omjeri transmisije

Ukupni prijenosni omjer (i_{uk})	14,55
Prijenosni omjer diferencijala (i_{or})	4,5
Prijenosni omjer I. stupnja prijenosa ($i_{m,I}$)	3,23
Prijenosni omjer II. stupnja prijenosa ($i_{m,II}$)	2,4

4.7. Određivanje ostalih dijelova pogonskog sustava

Na slici 24. se može vidjeti shema pogonskog sustava minibusa. Neke od komponenti će biti detaljnije objašnjene u nastavku.



Slika 24. Shema pogonskog sustava električnog vozila

- a) **BMS** (engl. *Battery management system*) Osnovna zadaća upravljačkog sustava baterije (BMS-a) je optimizirati snagu baterije potrebi trošila, smanjiti rizik od oštećenja baterije na minimum te nadgledati i kontrolirati proces punjenja i pražnjenja baterije. Ciljevi sustava su spriječiti oštećenje baterije, produživanje njezinog životnog vijeka te osiguranje da će baterija uvijek biti spremna predati energiju.
- b) **DC/AC Inverter** (engl. *Direct current / alternating current*) služi za pretvorbu istosmjernog napona iz baterije u trofazni izmjenični potreban za pogon električnog pogonskog motora. Može pretvarati istosmjerni oblik napona u kvadratni, sinusni, te modificirani sinusni tj. kvazi-kvadratni oblik.
- c) **Upravljač elektromotora (kontroler)** je paket elektroničke opreme koji djeluje između baterije i motora da bi regulirao brzinu i ubrzanje vozila. Kontroler pretvara istosmjernu struju baterije u izmjeničnu kojom se napaja električni pogonski motor. Također regulira protok energije iz baterije prema ostalima komponentama automobila na električni pogon. Kontroler može okrenuti smjer vrtnje motora tako da automobil može voziti u natrag te može pretvoriti motor u generator (generatorsko kočenje).

Ovdje su navedene samo neke osnovne komponente, naravno postoji još komponenti poput kablova za napajanje, DC/DC pretvarača, visokonaponskih punjivih baterija o kojima će biti riječi u sljedećem poglavlju. Potrebno je imati i kompresor rashladnog sustava, visokonaponski sustav grijanja, punjač baterija te utičnicu za punjenje.

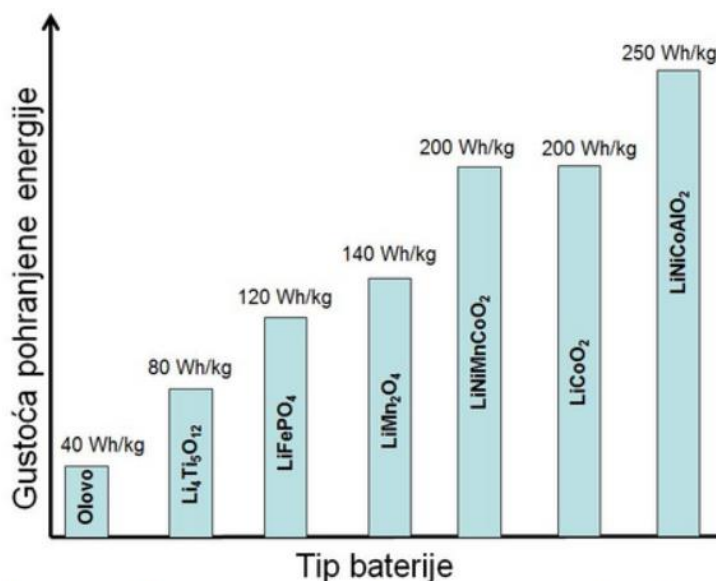
4.8. Baterije za minibus

U električna vozila ima smisla ugraditi jedino punjive baterije. Na tržištu su najčešće zastupljena 4 tipa baterija, a to su:

- a) **Olovna baterija:** Najstariji tip punjive baterije. Olovna baterija je robusna i ima ekonomičnu cijenu, ali ima nisku specifičnu energiju i ograničen broj ciklusa punjenja i pražnjenja.

- b) Nikal-kadmij:** Provjerena tehnologija baterija, NiCd se koristi kada su potrebni dugi vijek trajanja, visoka struja pražnjenja i ekstremne temperature. NiCd je jedna od najrobusnijih i najizdržljivijih baterija, te omogućava brzo punjenje uz minimalni stres na bateriju.
- c) Nikal-metal-hidrid:** Služi kao zamjena za NiCd jer ima samo blago toksične metale i osigurava veću specifičnu energiju. NiMH se koristi za medicinske instrumente, hibridne automobile i industrijske primjene.
- d) Litij-ion:** Litij-ionske baterije zamjenjuju mnoge primjene kojima su do sada dominirale nikal i olovne baterije. Zbog sigurnosnih problema, Li-ion treba zaštitno elektroničko sklopovlje. Skuplje su od većine drugih baterija, ali veliki broj ciklusa i nisko održavanje smanjuju troškove po ciklusu u odnosu na mnoge druge kemije.

Upravo zbog gore navedenih objašnjenja svake pojedine vrste baterija, za minibus će se odabrati Li-ion baterije.



Slika 25. Gustoća pohranjene energije Li-ion baterija u usporedbi s olovnom baterijom [19]

Sa grafa prikazanog na slici 25. se uočava razlika u specifičnoj energiji olovnih baterija i litij-ionskih baterija. Litij-ionska baterija s najmanjom specifičnom energijom već ima dvostruko veću specifičnu energiju od olovne baterije, dok neke druge vrste litij-ionskih baterija imaju višestruko veću specifičnu energiju.



Slika 26. Zastupljenost pojedinih vrsta baterija u svijetu

Na slici 26. je prikazana zastupljenost pojedinih vrsta baterija u svijetu. 2014. godine su prevladavale olovne baterije dok je proizvodnja litij-ionskih baterija bila gotovo duplo manja. Budući da proizvodnja električnih vozila raste iz godine u godinu, a olovne baterije zbog svoje niske specifične energije od 40 Wh/kg nisu prikladne za električna vozila, stoga se pretpostavlja da će do 2025. godine proizvodnja litij-ionskih baterija iznositi čak 70 % ukupne svjetske proizvodnje baterija.

Prema izračunatim podacima, potreban kapacitet baterija da bi se vozilo 8 sati kretalo po Braunschwig ispitnom voznom ciklusu (detaljno je objašnjeno u poglavlju 4.3), potreban je kapacitet baterija od 100 kWh. Međutim kao što je objašnjeno, kod Braunschweig ispitnog voznog ciklusa nema uspona pa bi taj kapacitet možda zadovoljio neke ravničarske linije, no isto tako jedan dio energije se po ljeti troši na hlađenje, odnosno zimi na grijanje. Prema tome, očito je da će biti potrebno povećati kapacitet baterija.

Odabrani su baterijski paketi tvrtke *EnerDel* koja se bavi proizvodnjom baterija za pogon komercijalnih vozila, autobusa i sl. Odabrani model *PE350-689* je prikazan na slici 27.



Slika 27. Baterijski paket tvrtke EnerDel, model PE350-689
[20]

Kapacitet jednog ovakvog baterijskog paketa sa slike 27. iznosi 21,2 kWh. U minibus će biti ugrađeno 6 ovakvih paketa te će ukupni kapacitet iznositi 127,2 kWh. Specifikacije baterije se nalaze u tablici 13.

Tablica 13. Specifikacije baterijskog paketa tvrtke EnerDel, model PE 350-689 [20]

EnerDel, PE350-689			
Raspored ćelija	168S-2P	Maks. kontinuirana struja pražnjenja	70 A
Modula u paketu	14 (12S-2P)	Maks. impulsna struja pražnjenja	105 A (10 sekundi)
Ćelija u modulu	24	Maksimalna struja punjenja	70 A
Ukupan broj ćelija	336	Dimenzije	1405 x 627 x 397
Maksimalan napon	689 V	Masa	265 kg
Minimalan napon	420 V	Grijanje/hlađenje	Zrakom, postoji opcija hlađenja tekućinom
Nazivni kapacitet	35 Ah		
Nazivna energija	21,2 kWh		

4.9. Neki od mogućih razmjesta baterija i ostalih komponenti pogona u minibusu

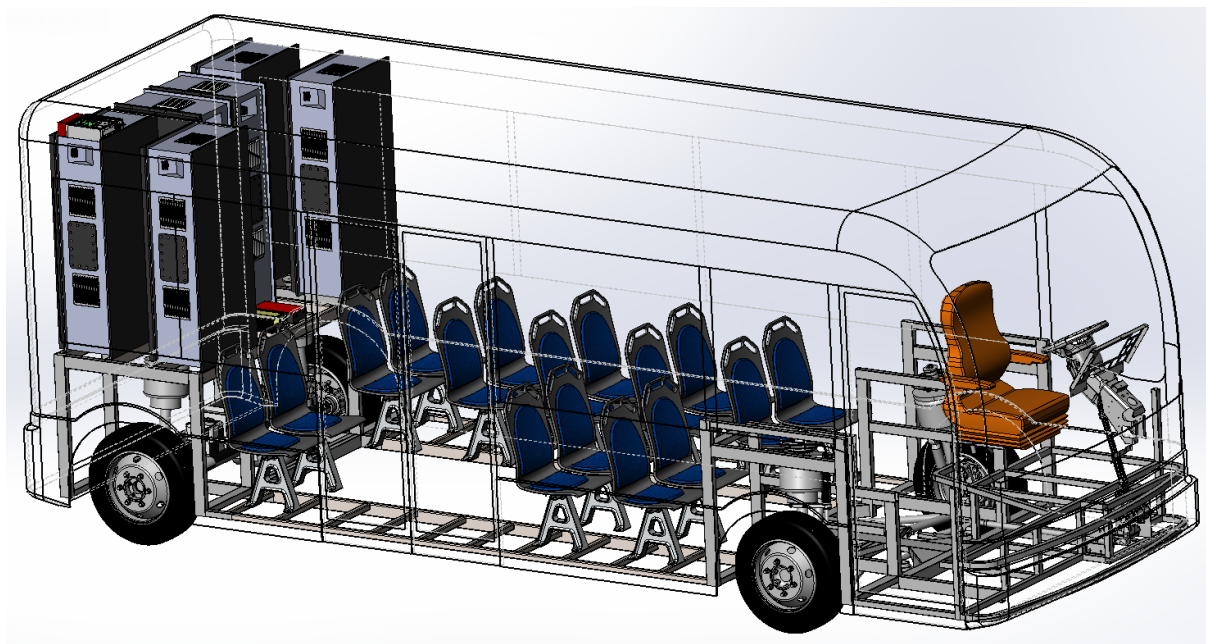
Jedan od značajnih nedostataka električnih vozila je veličina baterija, odnosno masa ukoliko se želi postići solidna autonomija vozila. U ovom slučaju masa baterija iznosi 1590 kg. U tablici 14. se nalaze glavne komponente pogona električnog minibusu i pomoću nje se lako zaključuje da su mase i dimenzije svih komponenti pogona gotovo zanemarive u usporedbi s masom i dimenzijama baterija te njihov razmještaj u minibusu neće biti od prevelikog značaja. Na slikama 28., 29., i 30. će biti prikazani neki od najprihvatljivijih mogućih razmjesta baterija. Biti će opisane prednosti i nedostaci svakog od 3 razmjesta baterija prikazanih u ovom radu. Dakle prihvatljivi razmještaji su:

- a) svih 6 baterija smjestiti iznad zadnje osovine,
- b) 2 baterije smjestiti na pod uz lijevi rub oplata, preostale 4 smjestiti iznad zadnje osovine,
- c) svih 6 baterija smjestiti u strop minibusu.

Tablica 14. Gabaritne mjere komponenti pogona i njihove mase

<p>Elektromotor</p> 	<p>Duljina: 510 mm Širina: 245 mm Visina: 245 mm</p>	<p>Masa: 120 kg</p>
<p>Punjač baterija</p> 	<p>Duljina: 504 mm Širina: 352 mm Visina: 84 mm</p>	<p>Masa: 12 kg</p>
<p>Upravljač električnog motora (kontroler)</p> 	<p>Duljina: 436 mm Širina: 200 mm Visina: 87 mm</p>	<p>Masa: 10,7 kg</p>
<p>DC/DC pretvarač</p> 	<p>Duljina: 300 mm Širina: 150 mm Visina: 70 mm</p>	<p>Masa: 4,8 kg</p>
<p>DC/AC pretvarač</p> 	<p>Duljina: 535 mm Širina: 320 mm Visina: 170 mm</p>	<p>Masa: 25 kg</p>
<p>Baterije</p> 	<p>Duljina: 1405 mm Širina: 627 mm Visina: 397 mm</p>	<p>Masa: 6 x 265 kg = 1590 kg</p>

4.9.1. Razmještaj a)

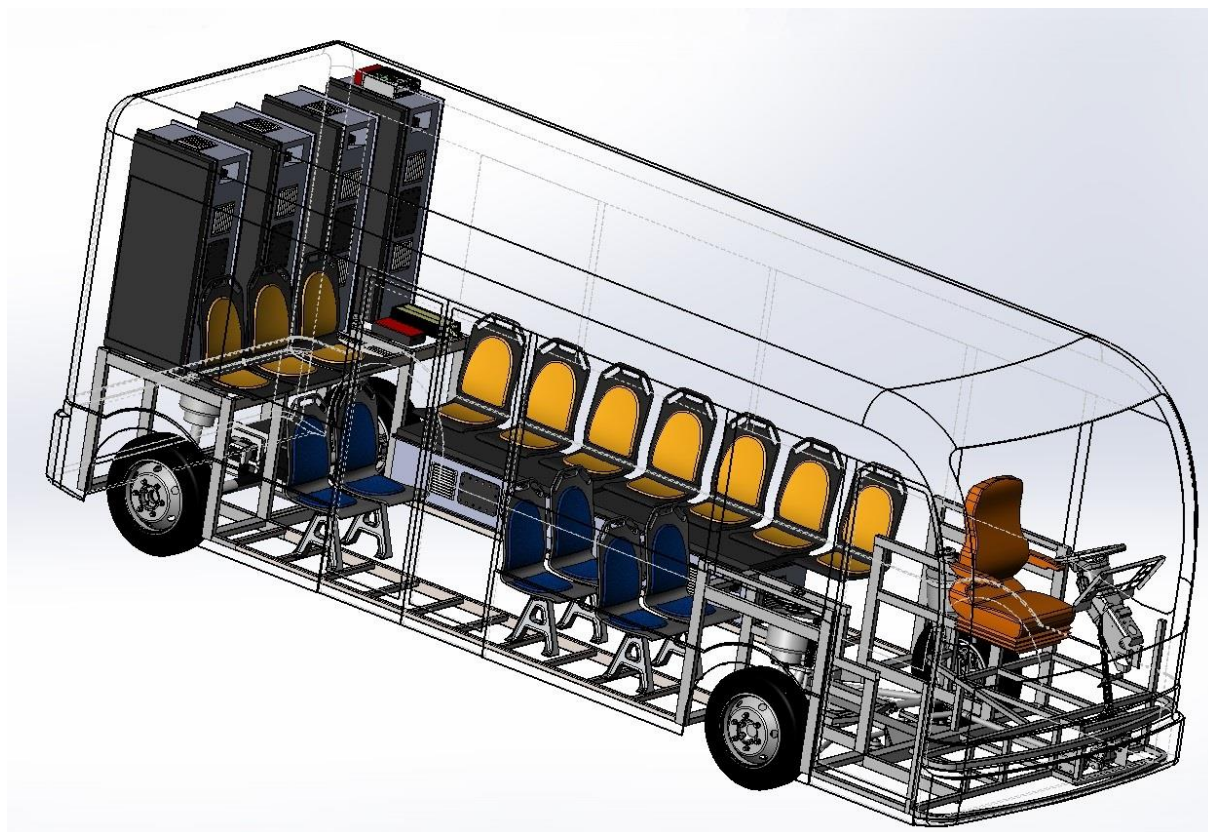


Slika 28. Razmještaj a)

Tablica 15. Prednosti i nedostaci razmještaja a)

Prednosti (+)	Nedostaci (-)
<ul style="list-style-type: none"> - putnički prostor minimalno zauzet pogonskim sustavom - težište minibusa se nalazi više i bliže je stražnjoj osovini što je pogodno za ostvarivanje većeg ubrzanja i svladavanje većih uspona (s gledišta pogona vozila) - visina putničkog prostora je ostala ista - očuvana niskopodnost 	<ul style="list-style-type: none"> - izgubljena stražnja sjedeća mjesta - nepovoljna raspodjela masa, tj. opterećenja na prednjim i stražnjim kotačima - veliko opterećenje na stražnjoj osovini (nepovoljno s gledišta konstrukcije) - zbog visokog težišta se gubi na stabilnosti minibusa - problem hlađenja ovako velike koncentrirane količine baterija

4.9.2. Razmještaj b)

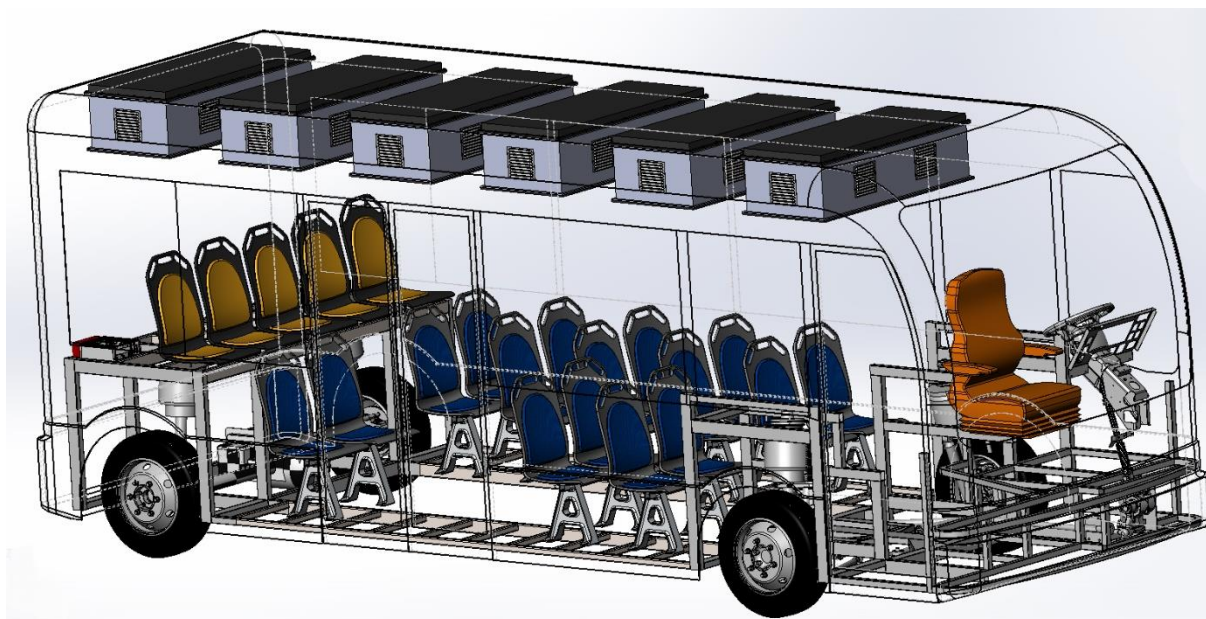


Slika 29. Razmještaj b)

Tablica 16. Prednosti i nedostaci razmještaja b)

Prednosti (+)	Nedostaci (-)
<ul style="list-style-type: none"> - moguće je smjestiti nekoliko sjedala na stražnji kraj - veća stabilnost nego kod razmještaja a) zbog nižeg težišta - povoljnija raspodjela masa na prednjoj i stražnjoj osovini nego kod razmještaja a) - visina putničkog prostora je ostala ista - očuvana niskopodnost - više prostora za stajanje nego kod razmještaja a) 	<ul style="list-style-type: none"> - izgubljeno nekoliko sjedala na lijevoj strani (ukupan broj sjedala jednak kao kod razmještaja a)) - nepovoljna raspodjela masa, tj. opterećenja na lijevoj i desnoj strani - lošije ubrzanje zbog nižeg težišta nego kod razmještaja a) - mogućnost svladavanja manjeg uspona zbog nižeg težišta nego kod razmještaja a) - zbog bočnih sjedala je neprirodniji položaj sjedenja za vrijeme vožnje

4.9.3. Razmještaj c)



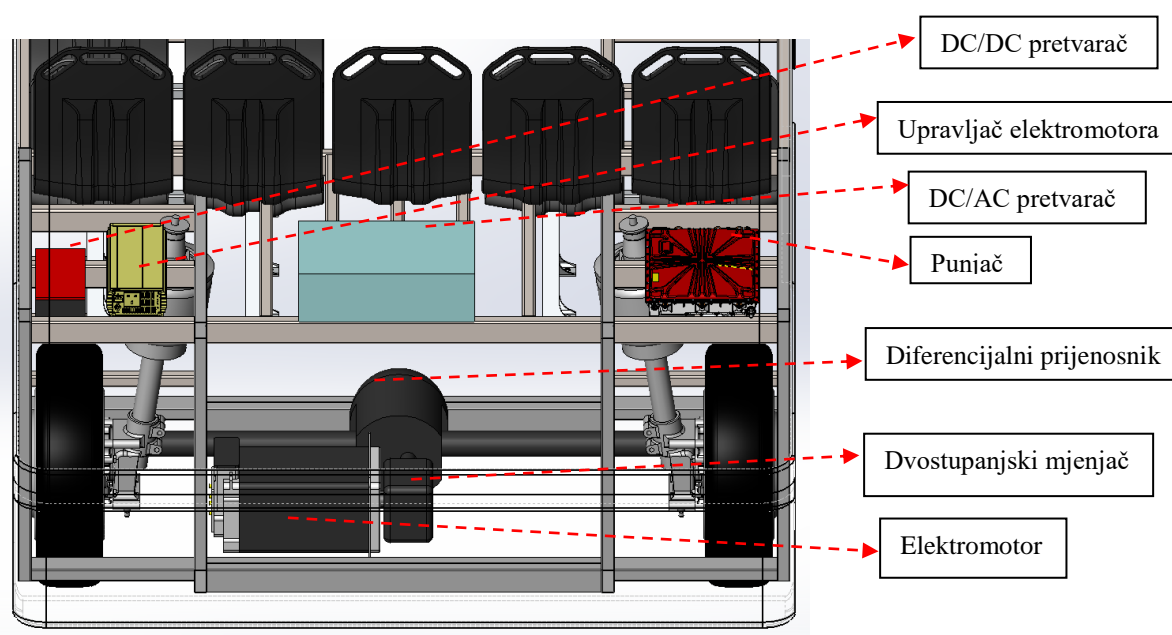
Slika 30. Razmještaj c)

Tablica 17. Prednosti i nedostaci razmještaja c)

Prednosti (+)	Nedostaci (-)
<ul style="list-style-type: none"> - moguće je smjestiti više sjedala na stražnji kraj nego kod razmještaja b) - ukupan broj sjedećih mjesta veći nego kod razmještaja a) i b) - puno bolja raspodjela masa na prednjoj i stražnjoj osovini nego kod razmještaja a) i b) - puno bolja raspodjela masa na lijevoj i desnoj strani nego kod razmještaja b) - više težište nego kod razmještaja a) i b), postiže se bolje ubrzanje i moguće je svladati velike uspone - za očekivati je lakše hlađenje baterija nego kod razmještaja a) i b) - očuvana niskopodnost 	<ul style="list-style-type: none"> - težište je jeko visoko pa je stabilnost lošija nego kod razmještaja a) i b) - niži strop (ako se zadržava ista visina vozila)

Prema navedenim prednostima i nedostacima, razmještaj c) s baterijama smještenim u stropu vozila se čini kao najprihvatljiviji. Kod razmještaja c) ima najviše sjedećih mjesta što je u putničkom aspektu najvažnije. Težište se nalazi visoko, što je s aspekta pogona jako korisno za ostvarivanje većih ubrzanja i svladavanje većih uspona. Baterije su jednako raspoređene po cijeloj površini krova, s čime se omogućava adekvatno hlađenje. Budući da su baterije jednako raspoređene po cijeloj površini krova, s time je ujedno riješen i problem raspodjele mase po osovinama, što je jako bitno s konstrukcijskog aspekta kako ne bi prevelika masa bila na samo jednoj osovini. Također oslobođen je stražnji dio minibusa na koji je moguće smjestiti sjedala po cijeloj širini minibusa te neke važnije i veće komponente električnog pogona smjestiti iza njih. Ako visina minibusa ostane ista i baterije se smjeste u krov, gubi se visina prostora za stajanje, no visina putničkog prostora iznosi 2410 mm, a visina baterija iznosi 397 mm, što nakon oduzimanja iznosi 2013 mm. Ako se u obzir uzme i debljina oplata koja odvaja baterije i putnički prostor, preostaje visina putničkog prostora od oko 2000 mm, a to je sasvim zadovoljavajuće za prosječnog putnika. Prednost, a koja je ujedno i najveći nedostatak razmještaja baterija u krovu je visoko težište, čime se narušava stabilnost vozila, no budući da minibus ne mora ostvarivati visoke performanse kao npr. trkaći automobili niti su brzine vožnje velike, taj nedostatak nije u potpunosti toliko značajan. Također, smještanje baterija u stropu autobusa je uobičajeno rješenje i može se naći kod autobusa koji postoje na tržištu.

Razmještaj glavnih komponenti električnog pogona (osim baterija) se nalazi na slici 31.



Slika 31. Razmještaj glavnih komponenti električnog pogonskog sustava

5. PRORAČUN PERFORMANSI ELEKTRIČNOG MINIBUSA

Nakon što se u poglavlju 4. pomoću otpora vožnje i koristeći programski paket *Microsoft Office Excel* izračunala potrebna snaga elektromotora te odredili prijenosni omjeri diferencijala i dvostupanjskog mjenjača, dolazi se do dijela gdje se trebaju izračunati performanse koje se mogu ostvariti pomoću odabranog pogonskog sustava. Dakle odrediti će se vučne sile u pojedinom stupnju prijenosa i to pri nazivnoj snazi motora te pri vršnoj snazi. Odrediti će se vrijeme potrebno da vozilo postigne najveću brzinu, ubrzanje u pojedinom stupnju prijenosa te će se odrediti maksimalni usponi koje je moguće ostvariti u pojedinom stupnju prijenosa pri nazivnoj, odnosno vršnoj snazi elektromotora. Sve će biti popraćeno s dijagramima i tablicama.

5.1. Vučni dijagrami

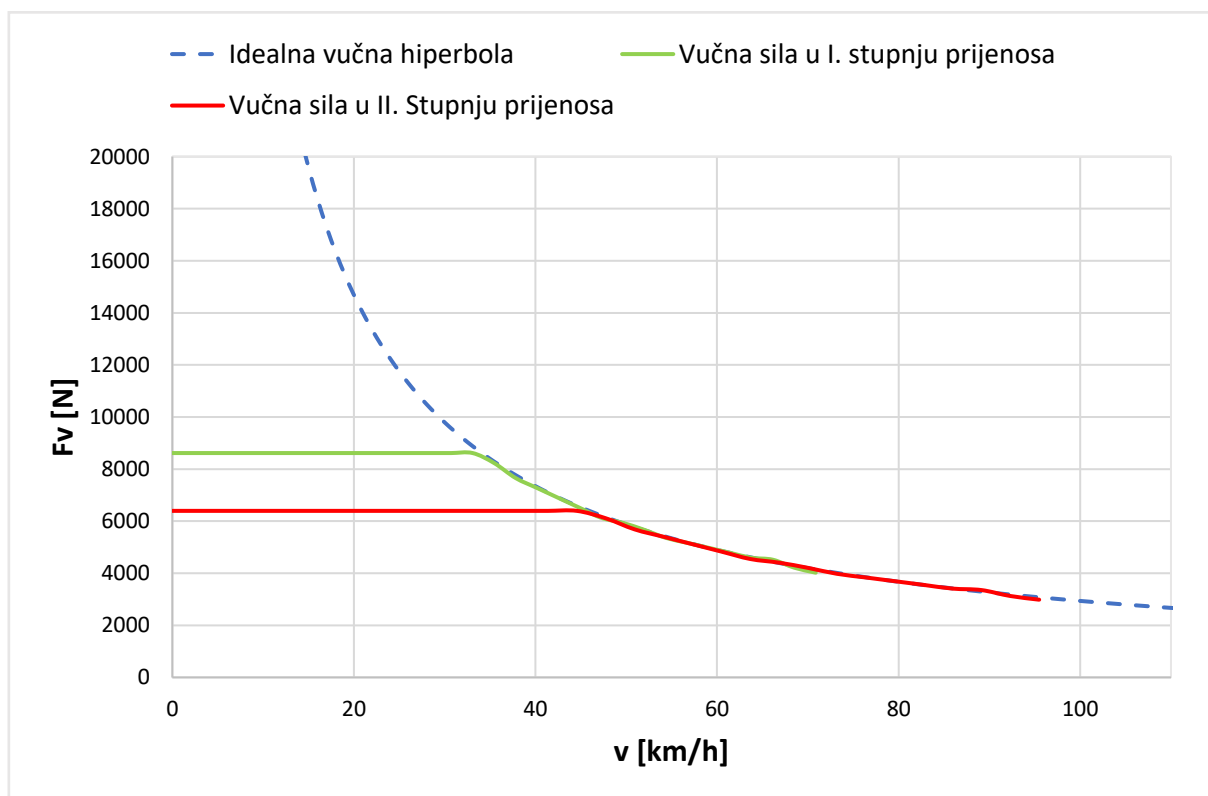
U tablici 18. će se prikazati iznos vučnih sila u pojedinom stupnju prijenosa u ovisnosti o brzini vožnje i to pri nazivnoj snazi, odnosno momentu motora, a u tablici 19. će se prikazati iznos vučnih sila u pojedinom stupnju prijenosa pri vršnoj snazi elektromotora.

Tablica 18. Vučne sile u pojedinom stupnju prijenosa pri nazivnoj snazi elektromotora

n [min^{-1}]	M_e [Nm]	v_1 [km/h]	F_{v1} [N]	v_2 [km/h]	F_{v2} [N]
0	225	0	8617,021	0	6396,14
250	225	2,362478	8617,021	3,182782	6396,14
500	225	4,724955	8617,021	6,365565	6396,14
750	225	7,087433	8617,021	9,548347	6396,14
1000	225	9,449911	8617,021	12,73113	6396,14
1250	225	11,81239	8617,021	15,91391	6396,14
1500	225	14,17487	8617,021	19,09669	6396,14
1750	225	16,53734	8617,021	22,27948	6396,14
2000	225	18,89982	8617,021	25,46226	6396,14
2250	225	21,2623	8617,021	28,64504	6396,14
2500	225	23,62478	8617,021	31,82782	6396,14
2750	225	25,98725	8617,021	35,01061	6396,14
3000	225	28,34973	8617,021	38,19339	6396,14
3250	225	30,71221	8617,021	41,37617	6396,14
3500	225	33,07469	8617,021	44,55895	6396,14
3750	215	35,43717	8234,043	47,74174	6111,867
4000	200	37,79964	7659,574	50,92452	5685,457
4250	190	40,16212	7276,596	54,1073	5401,184

n [min ⁻¹]	M_e [Nm]	v_1 [km/h]	F_{v1} [N]	v_2 [km/h]	F_{v2} [N]
4500	180	42,5246	6893,617	57,29008	5116,912
4750	170	44,88708	6510,638	60,47287	4832,639
5000	160	47,24955	6127,66	63,65565	4548,366
5250	155	49,61203	5936,17	66,83843	4406,229
5500	148	51,97451	5668,085	70,02121	4207,238
5750	140	54,33699	5361,702	73,204	3979,82
6000	135	56,69946	5170,213	76,38678	3837,684
6250	130	59,06194	4978,723	79,56956	3695,547
6500	125	61,42442	4787,234	82,75234	3553,411
6750	120	63,7869	4595,745	85,93513	3411,274
7000	118	66,14937	4519,149	89,11791	3354,42
7250	110	68,51185	4212,766	92,30069	3127,002
7500	105	70,87433	4021,277	95,48347	2984,865

Podaci iz tablice 18. će biti prikazani na slici 32.

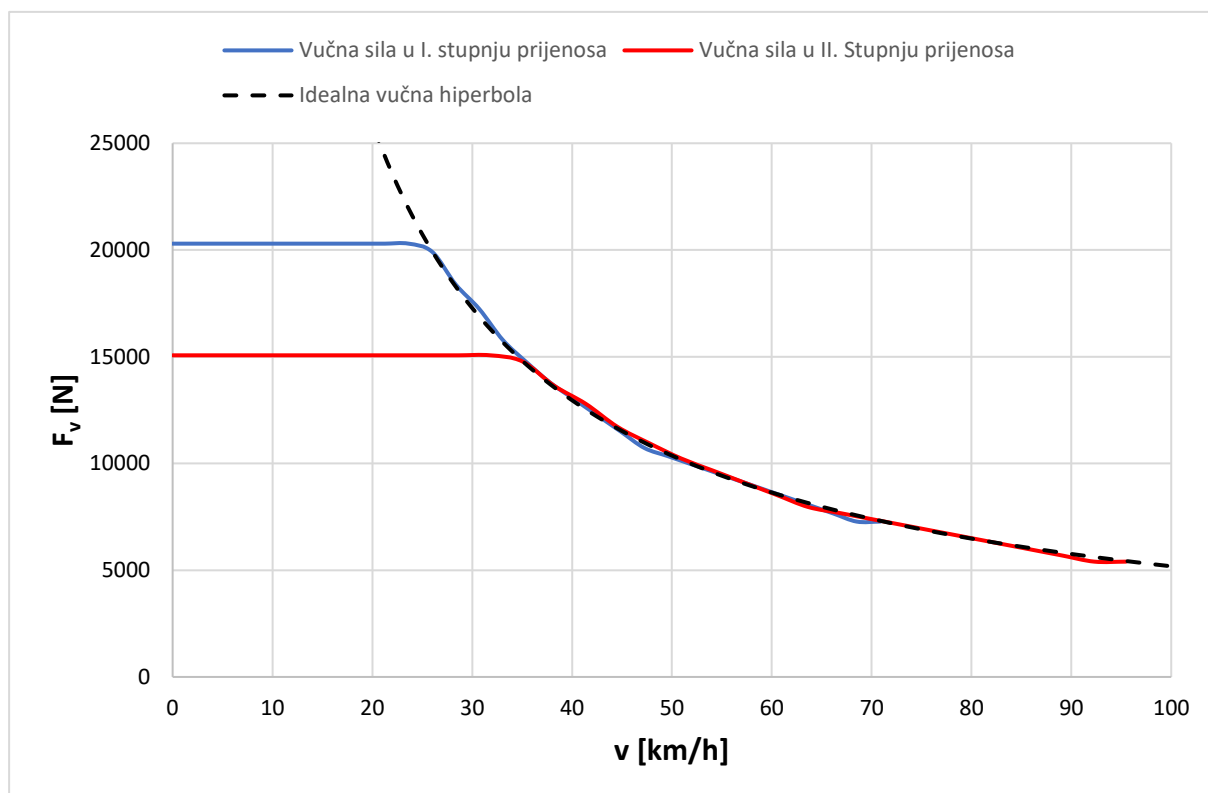


Slika 32. Dijagram vučnih sila pri nazivnoj snazi

Tablica 19. Vučne sile u pojedinom stupnju prijenosa pri vršnoj snazi elektromotora

n [min^{-1}]	M_e [Nm]	v_1 [km/h]	F_{v1} [N]	v_2 [km/h]	F_{v2} [N]
0	530	0	20297,87	0	15066,46
250	530	2,362478	20297,87	3,182782	15066,46
500	530	4,724955	20297,87	6,365565	15066,46
750	530	7,087433	20297,87	9,548347	15066,46
1000	530	9,449911	20297,87	12,73113	15066,46
1250	530	11,81239	20297,87	15,91391	15066,46
1500	530	14,17487	20297,87	19,09669	15066,46
1750	530	16,53734	20297,87	22,27948	15066,46
2000	530	18,89982	20297,87	25,46226	15066,46
2250	530	21,2623	20297,87	28,64504	15066,46
2500	530	23,62478	20297,87	31,82782	15066,46
2750	520	25,98725	19914,89	35,01061	14782,19
3000	480	28,34973	18382,98	38,19339	13645,1
3250	450	30,71221	17234,04	41,37617	12792,28
3500	412	33,07469	15778,72	44,55895	11712,04
3750	385	35,43717	14744,68	47,74174	10944,51
4000	360	37,79964	13787,23	50,92452	10233,82
4250	340	40,16212	13021,28	54,1073	9665,277
4500	320	42,5246	12255,32	57,29008	9096,732
4750	300	44,88708	11489,36	60,47287	8528,186
5000	280	47,24955	10723,4	63,65565	7959,64
5250	270	49,61203	10340,43	66,83843	7675,367
5500	260	51,97451	9957,447	70,02121	7391,095
5750	250	54,33699	9574,468	73,204	7106,822
6000	240	56,69946	9191,489	76,38678	6822,549
6250	230	59,06194	8808,511	79,56956	6538,276
6500	220	61,42442	8425,532	82,75234	6254,003
6750	210	63,7869	8042,553	85,93513	5969,73
7000	200	66,14937	7659,574	89,11791	5685,457
7250	190	68,51185	7276,596	92,30069	5401,184
7500	190	70,87433	7276,596	95,48347	5401,184

Podaci iz tablice 19. će biti prikazani na slici 33.

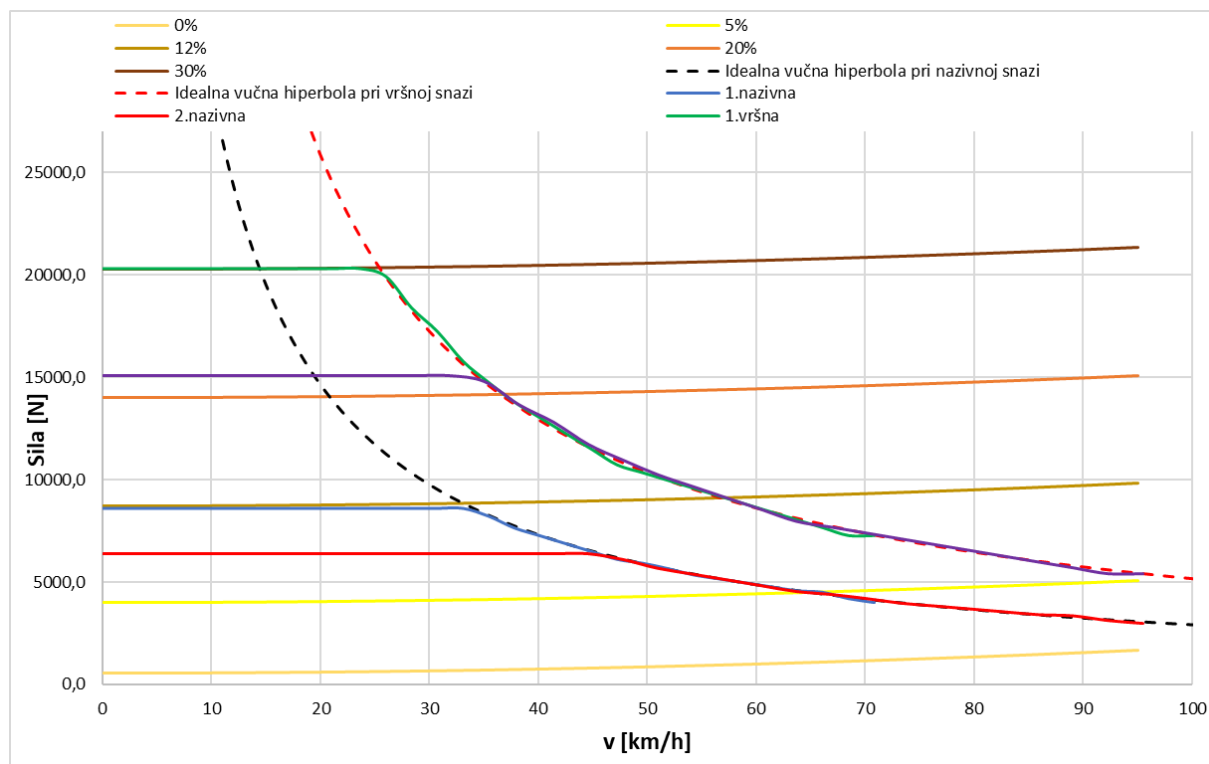


Slika 33. Dijagram vučnih sila pri vršnoj snazi

Sada će se prikazati tablica gdje su izračunati otpori vožnje pri usponima od 5 %, 12 %, 20 % te 30 %.

Tablica 20. Ukupni otpori vožnje pri usponima od 5 %, 12 %, 20 % i 30 %

v [km/h]	$F_{k,0}$ [N]	$F_{k,5}$ [N]	$F_{k,12}$ [N]	$F_{k,20}$ [N]	$F_{k,30}$ [N]	$F_{u,5}$ [N]	$F_{u,12}$ [N]	$F_{u,20}$ [N]	$F_{u,30}$ [N]	F_z [N]	$F_{R,0}$ [N]	$F_{R,5}$ [N]	$F_{R,12}$ [N]	$F_{R,20}$ [N]	$F_{R,30}$ [N]
0	549,4	548,7	545,4	538,7	526,2	3429	8181,7	13467,3	19732,2	0,0	549,4	3977,9	8727,1	14006,0	20258,4
5	549,4	548,7	545,4	538,7	526,2	3429	8181,7	13467,3	19732,2	3,0	552,4	3980,9	8730,2	14009,0	20261,4
10	549,4	548,7	545,4	538,7	526,2	3429	8181,7	13467,3	19732,2	12,2	561,5	3990,1	8739,3	14018,2	20270,5
15	549,4	548,7	545,4	538,7	526,2	3429	8181,7	13467,3	19732,2	27,4	576,7	4005,3	8754,5	14033,4	20285,7
20	549,4	548,7	545,4	538,7	526,2	3429	8181,7	13467,3	19732,2	48,7	598,0	4026,5	8775,8	14054,6	20307,0
25	549,4	548,7	545,4	538,7	526,2	3429	8181,7	13467,3	19732,2	76,0	625,4	4053,9	8803,2	14082,0	20334,4
30	549,4	548,7	545,4	538,7	526,2	3429	8181,7	13467,3	19732,2	109,5	658,8	4087,4	8836,6	14115,5	20367,8
35	549,4	548,7	545,4	538,7	526,2	3429	8181,7	13467,3	19732,2	149,0	698,4	4126,9	8876,2	14155,0	20407,4
40	549,4	548,7	545,4	538,7	526,2	3429	8181,7	13467,3	19732,2	194,6	744,0	4172,5	8921,8	14200,6	20453,0
45	549,4	548,7	545,4	538,7	526,2	3429	8181,7	13467,3	19732,2	246,3	795,7	4224,2	8973,5	14252,3	20504,7
50	549,4	548,7	545,4	538,7	526,2	3429	8181,7	13467,3	19732,2	304,1	853,5	4282,0	9031,2	14310,1	20562,5
55	549,4	548,7	545,4	538,7	526,2	3429	8181,7	13467,3	19732,2	368,0	917,3	4345,8	9095,1	14373,9	20626,3
60	549,4	548,7	545,4	538,7	526,2	3429	8181,7	13467,3	19732,2	437,9	987,3	4415,8	9165,1	14443,9	20696,3
65	549,4	548,7	545,4	538,7	526,2	3429	8181,7	13467,3	19732,2	513,9	1063,3	4491,8	9241,1	14519,9	20772,3
70	549,4	548,7	545,4	538,7	526,2	3429	8181,7	13467,3	19732,2	596,0	1145,4	4573,9	9323,2	14602,0	20854,4
75	549,4	548,7	545,4	538,7	526,2	3429	8181,7	13467,3	19732,2	684,2	1233,6	4662,1	9411,4	14690,2	20942,6
80	549,4	548,7	545,4	538,7	526,2	3429	8181,7	13467,3	19732,2	778,5	1327,9	4756,4	9505,6	14784,5	21036,9
85	549,4	548,7	545,4	538,7	526,2	3429	8181,7	13467,3	19732,2	878,8	1428,2	4856,7	9606,0	14884,8	21137,2
90	549,4	548,7	545,4	538,7	526,2	3429	8181,7	13467,3	19732,2	985,3	1534,6	4963,2	9712,4	14991,3	21243,6
95	549,4	548,7	545,4	538,7	526,2	3429	8181,7	13467,3	19732,2	1097,8	1647,2	5075,7	9824,9	15103,8	21356,2



Slika 34. Dijagram vučnih sila na kojem su ucrtani otpori vožnje pri usponima od 5 %, 12 %, 20% i 30 %

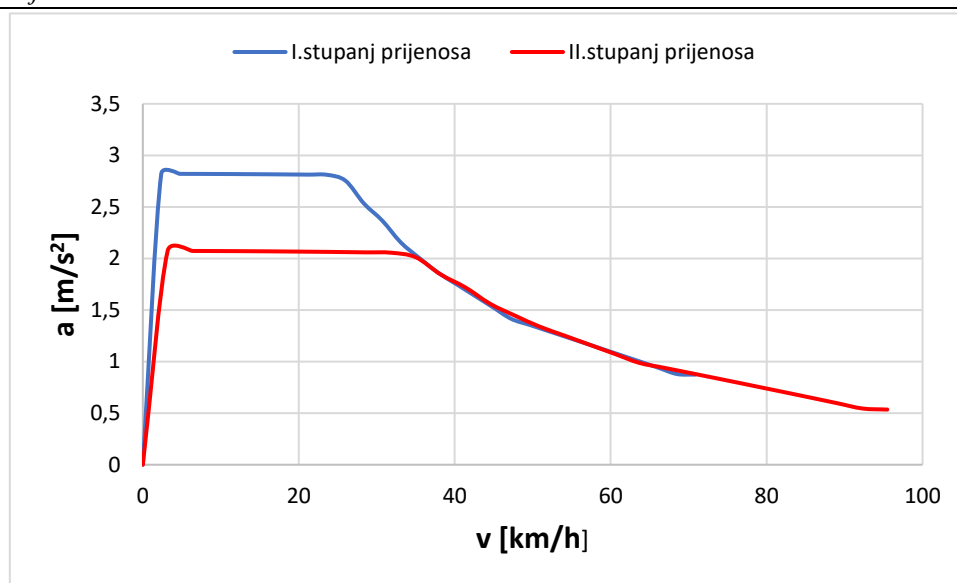
Iz dijagrama sa slike 34. se uočava da je pri nazivnoj snazi elektromotora moguće svladati uspon od 12 % u prvom stupnju prijenosa, sve uspone ispod 12 % je moguće svladati u drugom stupnju prijenosa. Pri vršnoj snazi elektromotora, uspon od 20 % pa čak i malo strmiji uspon je moguće svladati u drugom stupnju prijenosa, no za traženi uspon od 30 % je potrebno prebaciti u prvi stupanj prijenosa. Budući da su ceste s usponom od 20-30 % zbilja rijetke na našim prostorima, vozilo će se moći kretati većinu vremena pri nazivnoj snazi elektromotora.

5.2. Ubrzanje električnog minibusa

Pri računanju ubrzanja električnog minibusa, koristit će se vršna snaga elektromotora. Prema proizvođaču, odabrani elektromotor može raditi pri vršnoj snazi duže od 3 minute. Ubrzanje u pojedinom stupnju prijenosa, odnosno vrijeme potrebno za ubrzanje motora do najveće brzine će biti prikazano u tablicama i dijagramima.

Tablica 21. Ubrzanje u pojedinom stupnju prijenosa

n [min ⁻¹]	Pe [kW]	a_1 [m/s ²]	a_2 [m/s ²]
0	0	0	0
250	13,9	2,8	2,1
500	27,8	2,8	2,1
750	41,6	2,8	2,1
1000	55,5	2,8	2,1
1250	69,4	2,8	2,1
1500	83,3	2,8	2,1
1750	97,1	2,8	2,1
2000	111,0	2,8	2,1
2250	124,9	2,8	2,1
2500	138,8	2,8	2,1
2750	149,7	2,8	2,0
3000	150,8	2,5	1,8
3250	153,2	2,4	1,7
3500	151,0	2,2	1,6
3750	151,2	2,0	1,4
4000	150,8	1,9	1,3
4250	151,3	1,8	1,3
4500	150,8	1,6	1,2
4750	149,2	1,5	1,1
5000	146,6	1,4	1,0
5250	148,4	1,4	0,9
5500	149,7	1,3	0,9
5750	150,5	1,2	0,8
6000	150,8	1,2	0,8
6250	150,5	1,1	0,7
6500	149,7	1,1	0,7
6750	148,4	1,0	0,6
7000	146,6	0,9	0,6
7250	144,3	0,9	0,5
7500	149,2	0,9	0,5

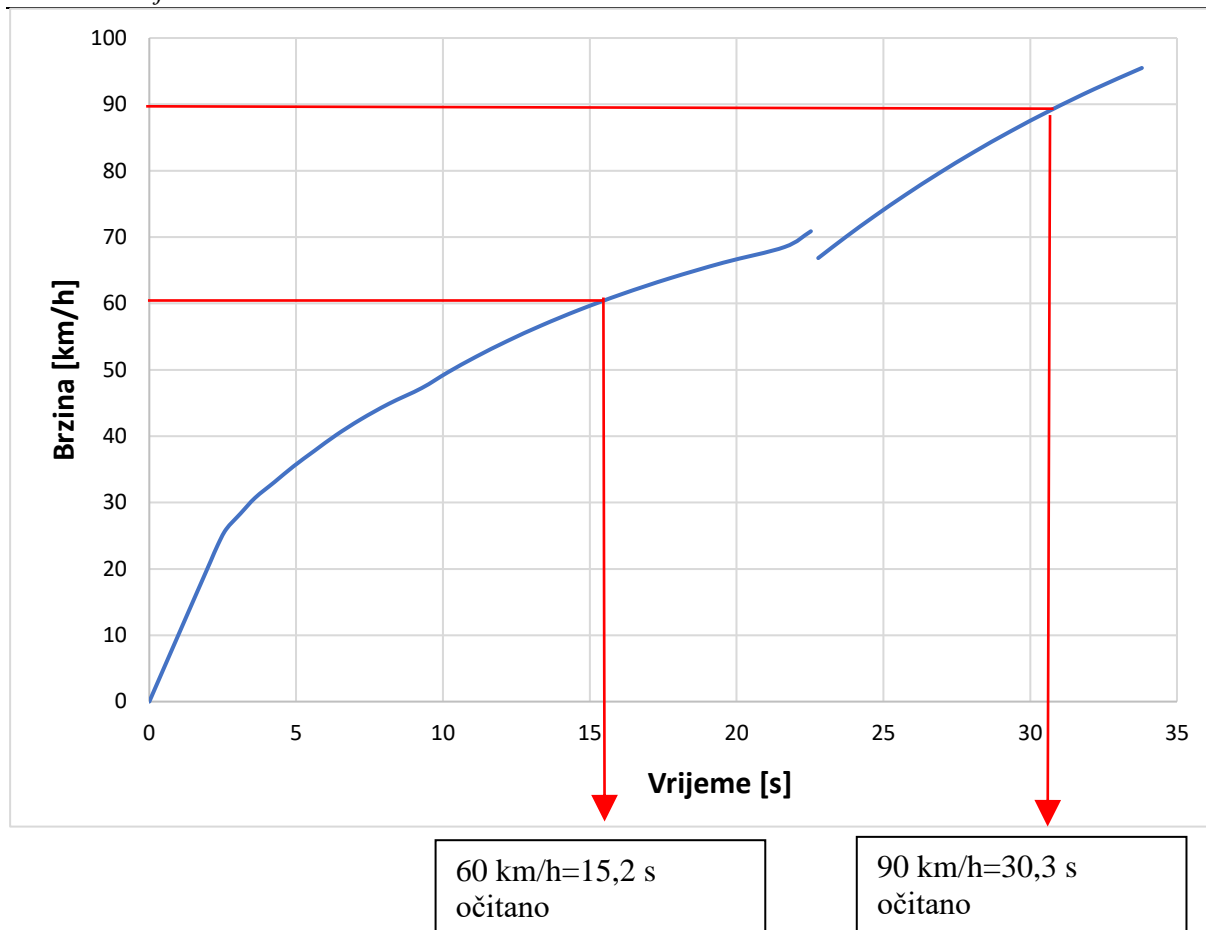


Slika 35. Dijagram ubrzanja u ovisnosti o stupnju prijenosa

Iz dijagrama sa slike 35. se uočava da maksimalno ubrzanje koje vozilo može ostvariti pri vršnoj snazi i u prvom stupnju prijenosa iznosi $2,82 \text{ m/s}^2$. Da bi ovaj podatak bio razumljiviji, pomoću tablice 22. i dijagrama na slici 36. će se prikazati vrijeme potrebno da minibus postigne ubrzanje do 60 km/h , odnosno da postigne maksimalnu brzinu od 90 km/h .

Tablica 22. Vrijeme potrebno za ubrzanje do maksimalne brzine

$n \text{ [min}^{-1}]$	$v_1 \text{ [km/h]}$	$t_2 \text{ [s]}$	$v_2 \text{ [km/h]}$	$t_2 \text{ [s]}$
0	0	0	0	
250	2,362478	0,232618	3,182782	
500	4,724955	0,465285	6,365565	
750	7,087433	0,698047	9,548347	
1000	9,449911	0,930953	12,73113	
1250	11,81239	1,164052	15,91391	
.	.	.	.	
.	.	.	.	
5000	47,24955	9,277889	63,65565	
5250	49,61203	10,16342	66,83843	22,78208
5500	51,97451	11,13074	70,02121	23,72225
5750	54,33699	12,19197	73,204	24,71319
6000	56,69946	13,36176	76,38678	25,76113
6250	59,06194	14,65796	79,56956	26,87353
6500	61,42442	16,10255	82,75234	28,05939
6750	63,7869	17,72296	85,93513	29,32974
7000	66,14937	19,55377	89,11791	30,6983
7250	68,51185	21,6393	92,30069	32,1824
7500	70,87433	22,53208	95,48347	33,80439

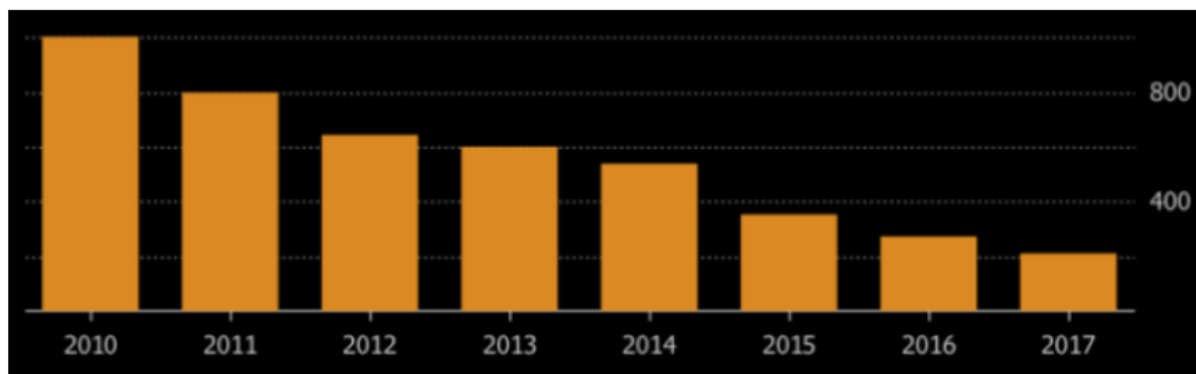


Slika 36. Dijagram brzine u ovisnosti o vremenu u ovisnosti o stupnju prijenosa

Iz dijagrama sa slike 36. je vidljivo da vozilo postiže brzinu od 60 km/h za 15,2 sekunde, dok mu za postizanje maksimalne brzine od 90 km/h treba 30,3 sekunde. U prvoj brzini je moguće postići brzinu od čak 70 km/h što pomaže kod gradske vožnje jer neće biti potrebe za čestim promjenama stupnja prijenosa. Također do pregrijavanja elektromotora neće doći jer proizvođač deklarira mogućnost od preopterećenja tj. vožnju pri vršnoj snazi u trajanju dužem od 3 minute, što je znatno više nego li je potrebno vremena za postizanje maksimalne brzine.

6. TROŠKOVNIK ELEKTRIČNOG POGONSKOG SUSTAVA

Za početak je potrebno napomenuti da troškovnik električnog pogonskog sustava pretežito ovisi o cijeni 1 kWh baterije. Kao što je već ranije spomenuto, u današnje vrijeme se u vozila pretežito ugrađuju litij-ionske baterije. Od 2010. godine do 2018. godine se cijena 1 kWh litij-ionske baterije višestruko snizila, a pad cijene je prikazan na slici 37.



Slika 37. Pad cijene 1 kWh litij-ionske baterije od 2010. godine

Na slici 37. je prikazano kako je 1 kWh litij-ionske baterije u 2010. godini koštao otprilike \$1000, no zbog rastućeg proizvodnje električnih vozila, a samim time i litij-ionskih baterija, cijena 1 kWh se do 2017. godine spustila na nešto iznad \$200. Neka predviđanja su da bi do 2025. godine cijena mogla pasti na \$75/kWh, s čime bi cijena baterija iz minibusu mogla pasti na oko 60.000 kn.

U konceptualni minibus su ugrađivane samo one komponente koje preporučuje proizvođač elektromotora. Postoje i jeftinije komponente, no odabrane su preporučene i već dobro ispitane u eksploataciji. U tablici 23. su prikazane komponente električnog pogonskog sustava i njihove cijene.

Tablica 23. Cijene komponenti električnog pogonskog sustava konceptualnog minibusu

Komponenta	Cijena u \$	Cijena u kn
Elektromotor	4.500	28.612
Baterije	48.000	305.202
Upravljač elektromotora	9.680	61.550
Punjač	6.302	40.070
DC/DC pretvarač	5.686	36.153
DC/AC pretvarač	13.367	84.992
BMS	600	3.815
UKUPNO	88.135	560.394

Proizvođač baterija *Enerdel*, koje su korištene u minibusu, tvrdi da iskoristivost njihovih baterija iznosi 97 % [21]. S druge strane, tvrtka *Brusa* koja proizvodi punjač koji je ugrađen u minibus, tvrdi da je iskoristivost njihovog punjača 94 % [22]. Kada se te dvije vrijednosti pomnože, dobije se stupanj korisnosti punjenja $\eta_{b,p}$ koji iznosi 0,91. Kapacitet baterija korištenih u radu iznosi 127,2 kWh, no zbog stupnja korisnosti punjenja, da bi se baterije napunile do kraja, potrebno je utrošiti 139,8 kWh energije.

Cijena električne energije u Republici Hrvatskoj često varira, također postoje 2 tarifne cijene. Visoka tarifa, koja se obračunava zimi od 7-21 sat, a ljeti od 8-22 sata. Niska tarifa se obračunava zimi od 21-7 sati, a ljeti od 22-8 sati. Cijena visoke tarife iznosi 0,35 kn/kWh, dok cijena niske tarife iznosi 0,17 kn/kWh. Također treba naglasiti da su navedene cijene za poduzetnike. Cijene električne energije za kućanstvo su znatno veće, pritom je nužno plaćati naknadu za obnovljive izvore i visokoučinkovitu kogeneraciju u iznosu od 0,105 kn/kWh (20.9.2018.) [23].

Da bi financijska isplativost bila što veća, minibus će se puniti preko noći prema niskoj tarifi cijene električne energije. Niska tarifa traje 10 sati i ljeti i zimi. Da bi se baterije iz minibusu kojima je ukupni kapacitet 127,2 kWh, mogle napuniti za 10 sati, potrebna je velika snaga punjača. To je jedan od razloga zašto su korištene skuplje komponente. Snaga punjača *Brusa NLG667* [24] iznosi 20,75 kW, s kojim je moguće napuniti baterije za nešto manje od 7 sati uračunavši i stupanj korisnosti punjenja.

S navedenim cijenama i potrebnom utrošenom energijom se dolazi do cijene jednog punjenja koja iznosi 23,77 kn prema nižoj tarifi, odnosno 48,93 kn prema višoj. Na godišnjoj razini, ukoliko se vozilo koristi gotovo svaki dan, cijena električne energije kod punjenja pri nižoj tarifi iznosi 8.557 kn, a kod punjenja pri višoj tarifi 17.614 kn. Budući da je izračunato da minibus vozeći 8 sati prema Braunschweig ispitnom ciklusu (sa stajanjima) prijeđe 130 km, dobije se da cijena po prijeđenom kilometru iznosi 0,18 kn prema nižoj tarifi, odnosno 0,37 kn prema višoj tarifi. Usporedbe radi, minibus mase 7 t s Diesellovim motorom dovoljno snažnim za ostvarivanje istih performansi kao i s odabranim elektromotorom i s čestim stajanjima i ubrzanjima, lako može postići prosječnu potrošnju goriva od 20 l/100 km. Da bi vozilo s Diesellovim motorom prešlo put od 130 km, potrebno je 26 litara dizelskog goriva. Cijena dizelskog goriva iznosi 10,02 kn/l [25] (20.9.2018.), s čime se dolazi do cijene od 260,52 kn ili 2 kn/km. To je iznos potreban za odvoziti jednu smjenu od 8 sati.

Na godišnjoj razini, taj iznos dolazi do 93.787 kn. Ako se od tog iznosa oduzme cijena električne energije koju minibus s elektromotorom potroši, dobije se razlika od 85230 kn.

Cijena komponenti električnog pogonskog sustava minibusu iznosi oko 560.000 kn. Samo s razlikom godišnje cijene dizelskog goriva i električne energije se otplate sve komponente električnog pogonskog sustava u roku od 6,5 godina.

Također treba napomenuti da električna vozila zahtijevaju manje brige od vozila s ugrađenim Dieslovim motorom. Prema literaturi [26], troškovi održavanja električnog autobusa u odnosu na autobus sa konvencionalnim motorom s unutarnjim izgaranjem su otprilike 30 % niži.

Radi jednostavnijeg snalaženja, izrađena je tablica 24. u kojoj se nalaze svi podaci iz teksta. Podaci u tablici koji su u zagradi se odnose na cijene prema višoj tarifi.

Tablica 24. Troškovnik eksploatacije električnog minibusu i vozila s Dieslovim motorom

	ELEKTRIČNI MINIBUS	VOZILO S DIESELOVIM MOTOROM	JEDINICA
Prijeđeni put u jednom danu	130	130	km
Prijeđeni put u godinu dana	46.800	46.800	km
Cijena električne energije	0,17	-	kn/kWh
Cijena dizelskog goriva	-	10,02	kn/l
Cijena energenta prijeđenom kilometru	0,18 (0,37)	2	kn/km
Cijena energenta po smjeni od 8 h	23,77 (48,93)	260,52	kn
Cijena energenta na godišnjoj razini	8.557 (17614)	93.787	kn

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu je prikazan niskopodni električni minibus za javni gradski prijevoz koji bi zbog svojih dimenzija lakše prolazio gradskim ulicama te bi se lakše kretao po cestama s većim usponima te uživim vangradskim prometnicama. Također, njegova glavna svrha je vožnja linijama s manjim brojem putnika.

Prikazana je ugradnja električnog pogonskog sustava u niskopodni gradski minibus. Izračunate su energetske potrebe vozila i prema tome su odabrane baterije. Pomoću otpora vožnje je odabran elektromotor, koji omogućava vozilu adekvatne performanse: svladavanje uspona do 30 % s prihvatljivom brzinom te postizanje tražene maksimalne brzine od 90 km/h. U vozilo je ugrađen i dvostupanjski mjenjač koji ovisno o stupnju prijenosa, omogućava vožnju po cestama s velikim usponom te također razvijanje maksimalne brzine od 90 km/h na ravnoj cesti.

Također, bilo je potrebno odabrati najprihvatljiviji razmještaj baterija i drugih komponenata u prostoru vozila. Glavni kriteriji kod odabira razmještaja su da u vozilu ima što više sjedećih mjesta za putnike i da vozilo bude što povoljnije opterećeno s pogonskog i konstrukcijskog aspekta.

Budući da teži što manjem zagađenju okoliša, ugradnjom električnog pogonskog sustava se i taj segment ostvaruje.

Što se tiče financijske isplativosti, pomoću proračuna je dobiveno da se samo s razlikom cijene energenata u trajanju od 6,5 godina, (električna energija i dizelsko gorivo) mogu isplatiti sve komponente električnog pogonskog sustava. Također, troškovi održavanja su otprilike 30 % niži u odnosu na konvencionalni autobus s motorom s unutarnjim izgaranjem.

Ako se uzme u obzir da će vozilo biti u eksploataciji duže od 6,5 godina, njegova isplativost značajno raste.

LITERATURA

- [1] https://www.reading.ac.uk/web/files/finance/fcs-CTAMinibus_Legal_Going_to_Europe.pdf
- [2] <http://www.autozine.org/Archive/Volkswagen/classic/T1.html>
- [3] <http://www.unibox.hr/>
- [4] <http://www.excelconversions.co.uk/wheelchair-minibuses.php>
- [5] <https://www.fiatprofessional.com/ducato-passengers/minibus>
- [6] https://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc_germany_website/de/home_mpc/bus/home/new_buses/models/minibuses/Sprinter_City_e6_/fascination/bilder.html
- [7] <https://www.volkswagen.co.nz/media/498677/vw-crafter-minibus-brochure-2017.pdf>
- [8] https://www.google.hr/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&ved=2ahUKWwjJkeHx74fdAhWBGewKHWG6BeUQjhx6BAgBEAM&url=https%3A%2F%2Fcommons.wikimedia.org%2Fwiki%2FFile%3AMinibus_ZET_Zagreb.jpg&psig=AOvVaw0Kfkr9_8oELqz8deR8RcMA&ust=1535275045671935
- [9] http://infobus.pl/pierwszy-stratos-dla-mzk-bielsko-biala_more_75354.html
- [10] <https://www.mellor-coachcraft.co.uk/vehicles/orion-e/>
- [11] <https://static1.squarespace.com/static/5318a7c0e4b03ba2018b69f4/t/58ee05af3e00be5228a8a4e1/1491994044902/EvBROCHURE+Mar+2017+UPDATE+-+DIGITAL+VERSION+ONLY.pdf>
- [12] <https://web.archive.org/web/20141108085131/http://www.infobus.com.pl/text.php?id=42572>

-
- [13] <https://www.solarisbus.com>
- [14] <http://www.wolta.es/>
- [15] <http://www.bustocoach.com/en/content/bredamenarinibus-zeus-m-200-e-59-metres-electric-class-i-1-door>
- [16] http://repozitorij.fsb.hr/7455/1/Zavrsni_rad_Antonio_Saric.pdf
- [17] T.J. Barlow, S. Latham, I.S. McCrae i P.G. Boulter: "A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions", Velika Britanija, lipanj 2009.
- [18] <https://www.industry.usa.siemens.com/drives/us/en/electric-drives/hybrid-drives/automotive/Documents/elfa-components-data-sheets.pdf>
- [19] <https://www.schrack.hr/know-how/alternativni-izvori/litij-ionske-baterije/>
- [20] <http://enerdel.com/wp-content/uploads/downloads/2017/06/PE350-689-Vigor-Battery-Pack.pdf>
- [21] https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f11/merit08_ota.pdf
- [22] <https://www.brusa.biz/>
- [23] <http://www.hep.hr/elektra/poduzetnistvo/tarifne-stavke-cijene-1578/1578>
- [24] https://www.brusa.biz/fileadmin/template/Support-Center/Datenbl%C3%A4tter/BRUSA_DB_EN_NLG667.pdf
- [25] <https://www.hak.hr/info/cijene-goriva/>
- [26] <https://pdfs.semanticscholar.org/5484/5a891edbc79f4428d2d621f0626026b974cc.pdf>

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija

